utbm

david perrin

roulent les mécaniques

" Les roulements seront éternels... "

(L.F-X.- I & T.- 08/1999. n° 808. p.82-86.)

présentation

technique

mémoire

brevets & inventeurs

annexes

diaporama

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Note au lecteur

Ce document est à considérer comme la version papier d'une publication mise en ligne et ne peut en aucun cas la remplacer. Cette retranscription tente d'être aussi fidèle que la version informatique, c'est en sens que le format de ce document à été pensé comme un écran d'ordinateur.
Le fond de ce travail a été achevé en décembre 2000, complété puis porté sur Internet en mai 2001…

Novembre 2001.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement Régis Vasselet, *enseignant à l'UTBM*, pour sa disponibilité ainsi que pour la richesse des ouvrages du début du XXe siècle qu'il a mis à ma disposition *(bibliographie)*, Damien Vaisse, *directeur des archives départementales de Belfort*, et l'ensemble du personnel des archives départementales pour leur disponibilité ainsi que pour leur efficacité.

Je remercie aussi Michel Cotte, *directeur des Humanités de l'UTBM et responsable de l'unité de valeur HT07*, pour m'avoir permis d'" exploiter " ce sujet et m'avoir offert la possibilité de cette publication mise en ligne.

Mon travail doit à de nombreux auteurs *(bibliographie)* mais plus particulièrement à l'Ecole polytechnique.- *Paliers graisseurs et boites à huile, portefeuille des élèves*.- Ecole polytechnique. 1880. mais aussi à Claude Jacques et Davanture Claire.- S.N.R..- *Les roulements*.- Paris : S.N.R. Roulements et Nathan Communications. 1988.

Enfin, je remercie particulièrement l'entreprise S.N.R. pour la documentation constructeur fournie gracieusement ainsi que pour son aimable autorisation pour l'utilisation de ses photographies dans cette publication en ligne *(crédits photo)*.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

présentation

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Préface

Dans le cadre de la formation aux " Humanités " offerte aux étudiants - élèves ingénieurs de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, l'unité de valeur HT07 propose un titre à priori des plus ouverts : *" Culture technique : la genèse des objets "*. Cet enseignement est constitutif de l'esprit même des universités de technologie, figurant très tôt au *Guide de l'étudiant* de l'UT de Compiègne, où il fut créé par Yves Deforge.

Le travail proposé aux étudiants vise à comprendre le changement technique à partir des objets de l'industrie, en les replaçant tant dans le contexte de leur époque qu'en prenant le paramètre temps comme un axe privilégié d'observation. Le projet est ambitieux, et il ne peut être sérieusement conduit qu'à partir d'études de cas clairement délimitées. Le dossier demandé doit amener l'étudiant à une prise de conscience de la complexité des déterminants d'une innovation ou d'une filière technique, comme du rôle joué par l'environnement économique et social dans les choix technologiques.

David Perrin aborde " les roulements " comme une réponse possible au problème de l'optimisation de la rotation. Le thème pouvait apparaître comme austère par rapport aux " grands objets " qui attirent si facilement le regard. Mais, en ayant travaillé de manière ouverte et méthodique, il nous prouve l'intérêt remarquable de son sujet.

Il dresse d'abord un glossaire illustré des roulements actuels, pour ensuite nous inviter à plonger dans la chronologie des innovations et dans la diversité de leur genèse. Cela paraîtra peut-être un peu curieux au puriste de la méthode historique, mais c'est un souci pédagogique dont il faut à notre avis remercier David Perrin. Il s'agit d'éclairer un présent technique, parfois un peu opaque à comprendre au débutant, par son épaisseur et sa dynamique dans le temps. Le " vécu " du roulement en quelque sorte !

Comme très souvent, dès que l'on gratte un peu les faits techniques, il n'y a pas d'inventeur unique et définitif. Il s'agit plutôt d'un réseau d'innovateurs placés à plusieurs époques et s'inscrivant dans des champs très divers de préoccupations : principes mécaniques, fabrication, applications pratiques, optimisation… Sa plume, ou plutôt son clavier est là guidé par un essai de synthèse de nombreuses sources secondaires, notamment d'anciens manuels qui ne sont pas exempts d'interprétations historiques aujourd'hui jugées simplistes. Ce n'est pas très grave, car le scrupule de l'enquête rétablit de lui-même la complexité des faits : matériaux et lubrifiants disponibles, niveau du système technique de production, demande effective des marchés, culture professionnelle des diverses industries, etc.. Il montre notamment comment, entre 1880 et 1910, on assiste à un brusque épanouissement de cette solution technique à la fois mieux comprise sur le plan des principes, réalisable dans des conditions satisfaisantes,

et enfin pleinement adoptée par une industrie novatrice comme celle des cycles. L'invention était devenue innovation.

Mais David Perrin ne se contente pas de ce descriptif historique et technique déjà bien étoffé. Il nous a réservé pour finir une plongée dans les brevets, notamment de la période très innovante des premières années du siècle. Il fait là pleinement œuvre d'historien des techniques, n'hésitant pas au travail ingrat et délicat d'étude des sources primaires, qu'il nous restitue en une typologie du développement des idées neuves sur les roulements. Il nous montre ainsi une piste de recherche féconde, que lui-même ou d'autres se doivent de poursuivre.

Michel Cotte
Maître de conférences en Histoire des techniques,
Directeur du département des Humanités de l'UTBM.
(avril 2001)

Introduction

" Le roulement est un organe mécanique d'application universelle. Il est présent dans tous les mécanismes en mouvement dans lesquels il assure la liaison mobile de deux éléments en rotation l'un par rapport à l'autre. "

(dictionnaire de vulgarisation des techniques)

C'est à peu près la définition que tiennent tous les ouvrages techniques à ce sujet. Pas besoin d'en dire plus, c'est évident, la structure et le fonctionnement d'un roulement mécanique se comprennent au premier coup d'œil. Cependant sa conception, sa fabrication et son application mettent en œuvre un ensemble de connaissances étendues, complexes, en constante évolution et se diversifiant en fonction de chacune des familles de roulements auxquelles elles s'appliquent.

A simple titre d'exemple, il suffit de comparer deux articles parus dans la revue *Industrie & Techniques (bibliographie)* à dix ans d'intervalle. On voit en quoi les innovations sont loin de cesser dans ce domaine : des roulements à billes en céramique en 1988, à un article sur la recherche et le développement de ces organes mécaniques en 1999 au titre révélateur : *" Les roulements seront éternels… "*. Véritable " sel de la cuisinière " (si l'on peut oser une telle comparaison), les roulements font partie de ces solutions technologiques auxquelles l'ingénieur concepteur se retrouve forcément confronté et cela depuis quelques générations, à des époques où les roulements ne se nommaient pas ainsi mais plutôt : paliers, coussinets, voire même roues ou rondins…

Ma découverte du roulement à billes s'est faite avec étonnement il y a quelques années ; mon professeur de construction de l'époque m'avait alors présenté un roulement dont le rotulage ne gênait en rien le mouvement et le positionnement des éléments tournants. Je profite donc (égoïstement mais légitimement) de l'unité de valeur HT07 - *" Culture technique : la genèse des objets "* - pour en découvrir l' histoire. Ce travail de recherche va me confronter aux innovations technologiques d'une époque qui couvre en fait celle de l'humanité. Dès lors, mon bagage technique me permet de profiter des découvertes que je m'apprête à vous faire partager…

Cependant, avant toute étude, il convient de préciser l'objet de ce dossier et ses limites.

Avant d'entrer dans l'historique du roulement, on fera une présentation des standards (roulements à rouleaux coniques, cylindriques, sphériques,…). Cette présentation permettra une meilleure compréhension des termes et dénominations techniques propres aux roulements qui apparaîtront tout au long du dossier.

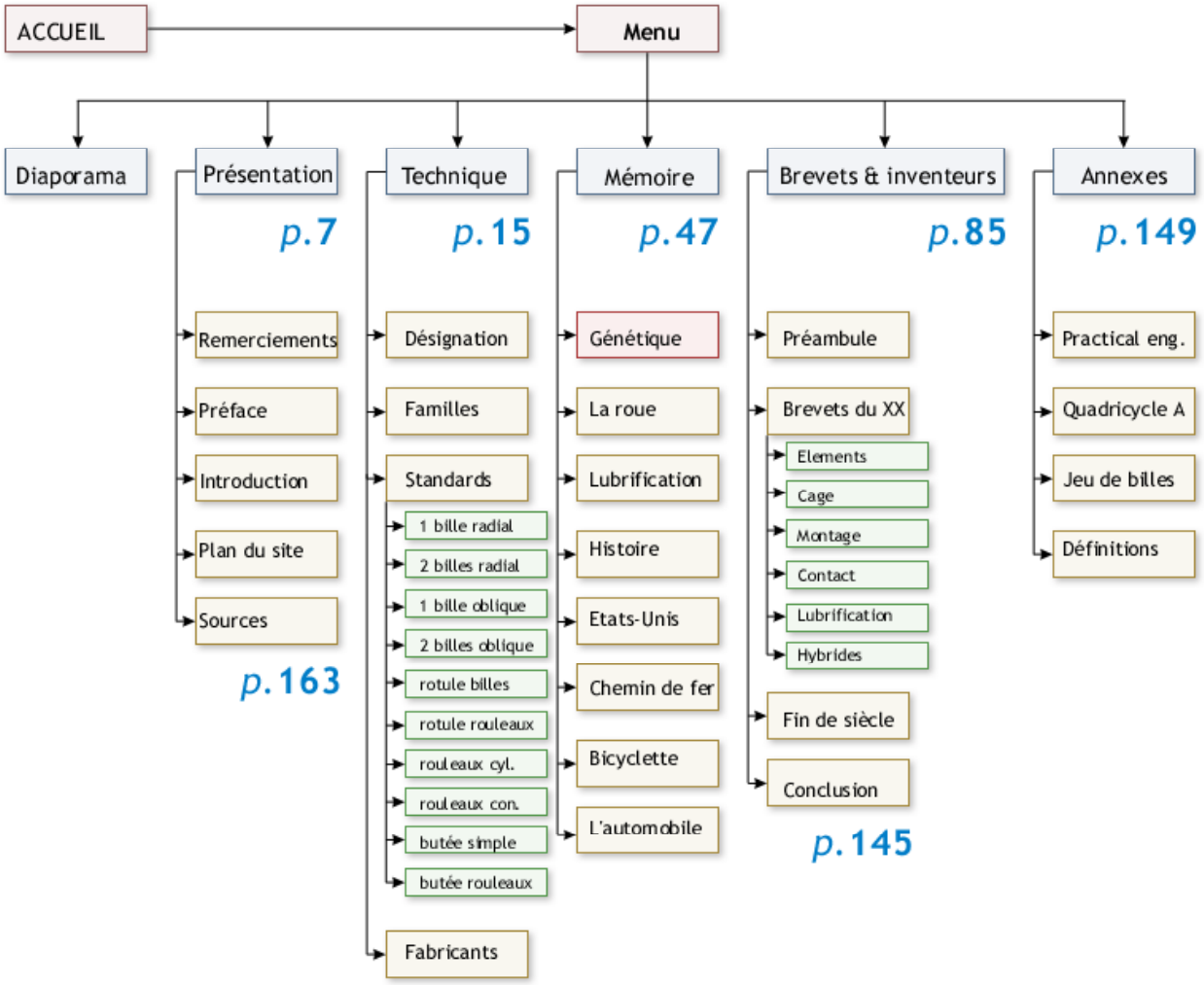
L'historique du roulement se fera alors après deux brefs historiques :
Celui du premier ancêtre connu du roulement : *la roue* - élément important à cette étude qui permettra de constater de la nécessité du guidage en rotation -.
Un complément essentiel au roulement : *la lubrification*.

Grâce au support de la génétique, on pourra alors se pencher sur l'histoire du roulement qui constitue véritablement le sujet de l'unité de valeur HT07 : des prémices aux grandes innovations, on pourra voir l'importance que ceux-ci ont eu vis à vis de deux moyens de transport que sont la bicyclette et l'automobile mais aussi les chemins de fer. Des précisions à cet historique seront apportées en détaillant de façon sommaire et personnelle les brevets d'inventions relatifs au roulements qui couvrent la période du siècle dernier et qui ont contribué à leur développement. En parallèle des innovations passées on abordera succinctement les innovations actuelles dans cette dernière partie.

Les limites de ce dossier se bornent aux frontières " historiques " du roulement, on ne fera pas apparaître de partie consacrée aux organes dérivés des roulements que sont par exemple les circulaires de rotation, les guidages rectilignes ou les vis à billes. De même la fabrication des roulements n'entrant pas dans ce dossier, on pourra tout de même - en compensation - lire l'annexe *" jeu de billes "* relative à ce sujet. On trouvera aussi en annexe des articles remontant à l'époque de la création des premiers roulements utilisés dans l'industrie (les références seront mentionnées dans le texte lorsqu'il y aura lieu).

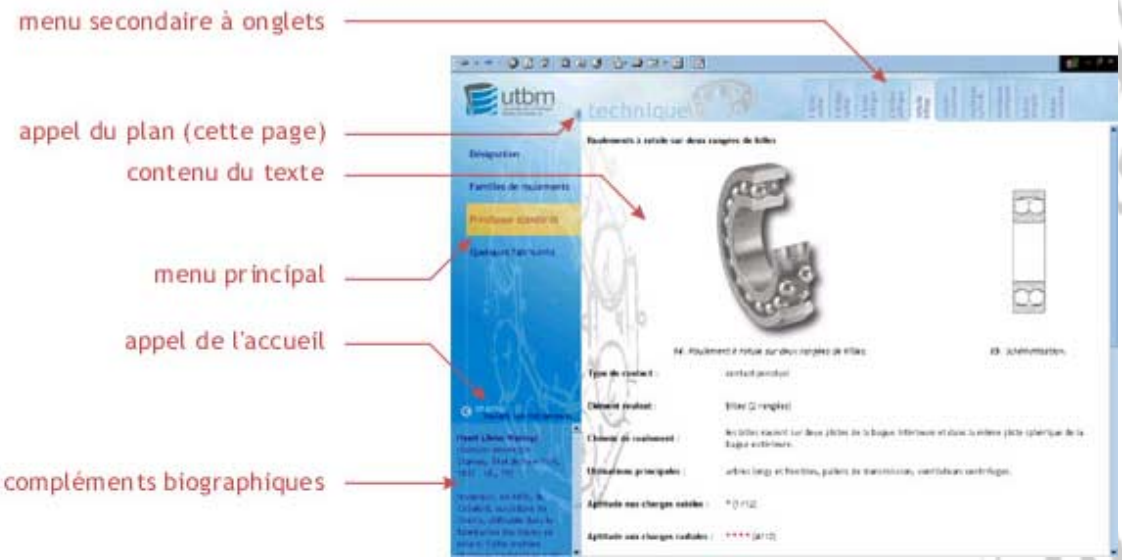
David Perrin
(david.perrin@utbm.fr)
1ère année Génie Mécanique et Conception, UTBM.

Sommaire / Plan du site



Le site est optimisé pour les navigateurs de génération 4.x.

Navigation conseillée en 1024x768 avec Microsoft Internet Explorer© v5.0 mode plein écran.



"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

technique

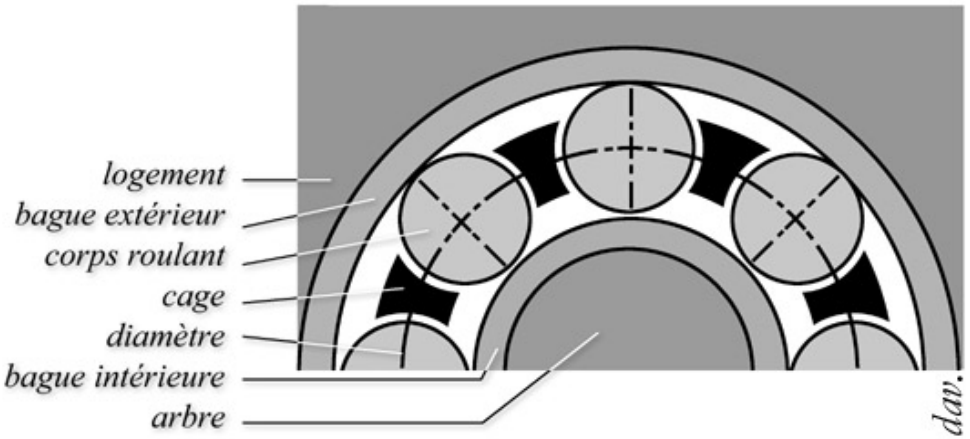
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Eléments de désignation

" Le roulement est un organe mécanique d'application universelle. Il est présent dans tous les mécanismes en mouvement dans lesquels il assure la liaison mobile de deux éléments en rotation l'un par rapport à l'autre. "

(dictionnaire de vulgarisation des techniques)

Pour la quasi-totalité des cas, un roulement se compose de la façon suivante *(fig 1)*:



1. *Coupe et description de roulement à bille.*

Notons que l'appellation de roulement provient des corps roulants qui, interposés entre les deux éléments en rotation l'un par rapport à l'autre - dénommés bagues - permettent le " roulement ", et non plus le frottement, entre les deux surfaces de contact.

On peut remarquer encore que le terme anglo-saxon de *bearing*, pour désigner un roulement, porte en lui l'idée de supporter, ce qui est une des principales fonctions d'un roulement. Par définition, on trouvera des roulements partout où il y a rotation. L'avantage de la réduction des frottements permet l'augmentation de la vitesse de rotation des systèmes et moteurs. Les exemples d'utilisation sont très

nombreux : du cycle au turboréacteur en passant par l'automobile, de la machine à laver à la machine-outil, de la remontée mécanique des stations de sports d'hiver (téléski) au Train à Grande Vitesse. Les cas où le palier lisse a subsisté concernent des applications sous fortes charges et faibles vitesses, en encombrement radial réduit (vilebrequin de moteur de voiture).

Bien que présent partout, le roulement n'est pas facile à observer, car pratiquement jamais apparent. Reprenons la démarche qui s'est effectuée au cours de l'histoire.

Pour déplacer un bloc de pierre en le faisant glisser, il faut fournir un effort important. Si nous plaçons dessous des rouleaux comme le firent les Égyptiens, l'effort pour réaliser le même déplacement est considérablement réduit. De même, si on intercale des rouleaux entre deux plaques, on réalise alors un système de roulement linéaire, similaire à celui utilisé par les Grecs pour leur bélier d'assaut. Si, au lieu de deux plaques, on prend deux cylindres creux tels que le diamètre de l'un des deux soit inférieur à celui de l'autre, et si on intercale des rouleaux entre ces deux cylindres, on est en présence d'un mécanisme où l'un des deux cylindres creux peut tourner par rapport à l'autre sans grand effort. Ce mécanisme est une forme primitive de roulement à rouleaux. Les deux cylindres ou anneaux concentriques sont appelés bagues, ce qui permet de définir une bague intérieure et une bague extérieure. Entre ces deux bagues sont interposés des corps roulants, car on s'aperçut rapidement que les rouleaux pouvaient être remplacés par des billes.

Il suffit maintenant, et ce fut un élément très vite découvert, d'adjoindre à ce dispositif une pièce permettant de maintenir un écartement convenable entre les corps roulants : nous appellerons cet élément la cage. Puis il convient, pour que les corps roulants se maintiennent sur la piste ainsi constituée, de munir les extrémités de bagues de rebords; on obtient alors ce qu'on appelle un roulement.

Les surfaces sur lesquelles se trouvent les corps roulants s'appelleront tout à fait logiquement les chemins de roulement, ou tout simplement chemins. Il est bien évident que le roulement que l'on vient de construire est des plus rudimentaires, mais le principe restera toujours valable.

Nous pouvons en déduire qu'un roulement est en général constitué de quatre parties : les deux bagues, les corps roulant *(fig 2)* et la cage *(fig 3)*.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les éléments roulants

2. *Eléments tournants ; billes, rouleaux : cylindriques, coniques, sphériques, aiguilles.*

Les éléments roulants se présentent sous deux types principaux :

- Les billes
- Les rouleaux

Les rouleaux peuvent avoir différentes formes : rouleaux cylindriques, rouleaux coniques, rouleaux tonneaux, aiguilles (qui sont des rouleaux cylindriques de faible diamètre et très allongés) voire même des formes moins répandues *(fig 44, fig 46)*. Ils sont souvent exécutés dans la même matière que celle employée pour la fabrication des bagues.

Les cages

3. *Cages de séparation des éléments tournants : moulées, agrafées, embouties.*

Les cages à billes ou à rouleaux ne participent jamais à la transmission de la charge sur le roulement. Elles peuvent cependant être soumises à des forces d'inertie, centrifuges, des secousses, etc.

Les cages sont centrées soit sur:

- les éléments roulants
- l'une ou l'autre des bagues

Elles peuvent être obtenues par emboutissage ; dans ce cas, elles sont exécutées en tôle d'acier. Dans certains cas, surtout pour de petits roulements, on utilise des cages en laiton. Les cages massives obtenues par tournage, perçage ou autre façonnage, sont en matières variées : acier doux, fonte de première qualité, laiton, alliage léger et quelquefois tissu bakélisé ou nylon.

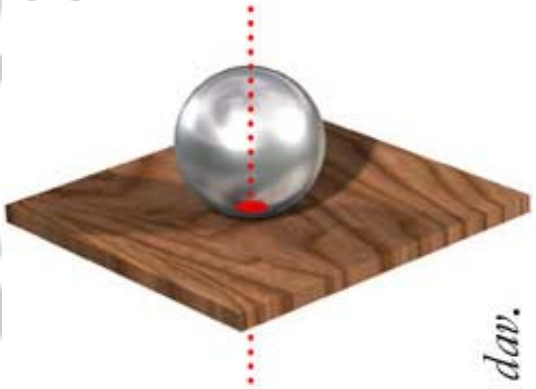
On appelle logement l'emplacement où va s'insérer le roulement : il existe donc une liaison entre la bague extérieure et le logement. L'axe qui vient s'insérer dans la bague intérieure s'appelle l'arbre, ce qui implique de la même manière une liaison entre l'arbre et la bague intérieure.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Familles de roulements

On distingue couramment deux grandes familles de roulements :

- à billes (contact bille-chemin, contact quasiment ponctuel) *(fig 4)*.
- à rouleaux (contact rouleau-chemin quasiment linéaire) *(fig 5)*.



4. *Bille-plan, contact ponctuel.*

5. *Rouleau-plan, contact linéaire.*

La réunion de plusieurs roulements à billes entre eux n'est utilisable que dans des cas très particuliers. De plus, on comprend d'ores et déjà que les roulements à rouleaux sont les mieux adaptés pour supporter des charges plus importantes (créés à cet effet: contact plus étendu). A l'origine, les roulements ont étés privilégié dans la rotation d'un système supportant une charge radiale (perpendiculaire à l'axe de l'arbre). Mais, la charge supportée par le roulement peut aussi être axiales (parallèle à l'arbre). Les deux principales familles de roulements se subdivisent alors suivant l'aptitude des roulements à supporter des charges radiales ou axiales. Pour répondre à ces différentes répartitions de charges, sont apparues les subdivisions suivantes :

Les roulements à contact radial :

- roulements à billes à contact radial
- roulements à rouleaux cylindriques
- roulements à aiguilles

Radial car la ligne de charge est radiale par rapport à l'axe.

Les roulements à contact oblique :

- roulements à billes à contact oblique
- roulements à rouleaux coniques

Monté en opposition avec un autre roulement de même nature pour assurer l'équilibrage axial, ils acceptent une combinaison de charges radiales et axiales dans un seul sens. A deux rangées de corps roulants, ils acceptent des charges axiales dans les deux sens.

Les roulements à rotule :

- roulements à billes
- roulements à rouleaux sphériques

Le chemin de roulement de la bague extérieure est sphérique qui permet un débattement angulaire de la bague intérieure. A billes, ils acceptent des charges radiales et de faibles charges axiales. A rouleaux, ils supportent des charges radiales et axiales très importantes.

Les butées :

- butées à billes
- butées à rouleaux sphériques

Elles acceptent un désalignement. A billes, elles supportent des charges axiales avec une vitesse limite faible. A rouleaux sphériques, elles supportent des charges axiales très importantes et des charges radiales limitées.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Différences détaillées

La partie qui va suivre présente les différences détaillées des principaux roulements utilisés dans l'industrie. La présentation choisie - similaire à une carte d'identité - va mettre en évidence les principaux points de distinction, ces différents points allant crescendo dans la précision et la difficulté technique.

La fiche est constituée des points suivants:

Dénomination standardisée.

Type de contact :	nature du contact, naturellement relatif au type d'élément roulant intervenant et au chemin de roulement.
Elément roulant :	billes, rouleaux cylindriques, rouleaux coniques, rouleaux tonneaux, aiguilles.
Chemin de roulement :	géométrie du chemin de roulement.
Utilisations principales :	domaines d'application principales du roulement et exemples d'utilisation.
Aptitude aux charges axiales :	capacité à résister aux efforts dans l'axe du roulement (échelle qualitative /12).
Aptitude aux charges radiales :	capacité à résister aux efforts dans le rayon du roulement échelle qualitative /12).
Vitesse limite de rotation :	domaine de vitesse maximale de rotation (échelle qualitative /12).

Rotulage admissible : défaut angulaire d'alignement admissible entre l'axe de l'arbre et l'axe du roulement (échelle qualitative /12).

Montage et démontage : informations relatives au montage du roulement.

Dérivées et variantes : dérivées légères de conception ou variantes plus prononcées du roulement (variantes avec déflecteurs exclues).

Commentaires : remarques propres au roulement et n'ayant pas leur place dans les rubriques précitées.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à une rangée de billes à contact radial

6. *Roulement à une rangée de billes à contact radial.*

7. *Schématisation.*

Type de contact : contact ponctuel

Elément roulant : billes (1 rangée)

Chemin de roulement : les chemins de roulement sont relativement profonds et les courbures conjuguées des billes et de ces chemins donnent un contact très favorable.

Utilisations principales : application de petits roulements à très grande vitesse, arbres courts très rigides, boîtes de vitesses, moteurs électriques, vilebrequin de vélomoteurs, dynamos, pompes, machines textiles, roue de remorque, électroménager, broche de machine à bois.

Aptitude aux charges axiales : * * * * (4/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * * (6/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * * * * * * * * (11/12)

Rotulage admissible : * * * * * (5/12)

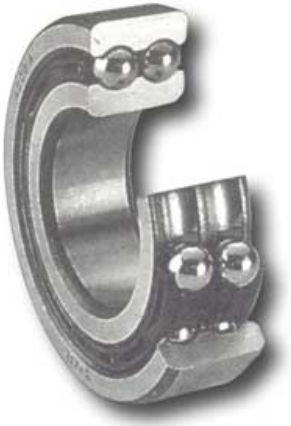
Montage et démontage : ces roulements n'ont pas la possibilité de s'aligner automatiquement, ils exigent un parallélisme rigoureux de l'arbre et du logement. Les roulements de ce type sont presque uniquement exécutés avec un alésage cylindrique.

Dérivées et variantes : Ils peuvent être munis d'une rainure sur la bague extérieure avec segment d'arrêt pour la fixation axiale.

Commentaires : ces roulements sont actuellement les plus employés.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à deux rangées de billes à contact radial



8. *Roulement à deux rangées de billes à contact radial.*

9. *Schématisation.*

Type de contact : contact ponctuel

Elément roulant : billes (2 rangées)

Chemin de roulement : les chemins de roulement sont relativement profonds et les courbures conjuguées des billes et de ces chemins donnent un contact très favorable.

Utilisations principales : application de petits roulements à très grande vitesse, arbres courts très rigides, boîtes de vitesses, moteurs électriques, vilebrequin de vélomoteurs, dynamos, pompes, machines textiles, roue de remorque, électroménager, broche de machine à bois.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * (6/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * * * (7/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * * * (6/12)

Rotulage admissible : * (1/12)

Montage et démontage : les deux rangées autorisent un meilleur alignement. Les roulements de ce type sont presque uniquement exécutés avec un alésage cylindrique.

Dérivées et variantes : la limite de vitesse peut être augmentée par l'emploi d'une cage spéciale. Ils peuvent être munis d'une rainure sur la bague extérieure avec segment d'arrêt pour la fixation axiale.

Commentaires : ---

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à billes à une rangée de billes à contact oblique

10. *Roulement à billes à une rangée de billes à contact oblique.*

11. *Schématisation.*

Type de contact : contact ponctuel

Elément roulant : billes (1 rangée)

Chemin de roulement : Le chemin de roulement de la bague extérieure comporte deux épaulements inégaux dont l'un assez faible permet à la bague extérieure de passer, soit grâce à un chauffage préalable ou éventuellement par tension élastique, sur le jeu de billes monté sur la bague intérieure.

Utilisations principales : boîte de réduction, broche de machine, moteurs électriques verticaux avec charge axiale, paliers de butée de pompes, machines-outils.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * * * * (9/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * (5/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * * * * (7/12)

Rotulage admissible : * * * * (4/12)

Montage et démontage : en général l'angle de contact est de 32°, mais il existe également des roulements obliques à 15°, 25° voire 40°. De plus la construction est telle qu'ils ne permettent que de très faibles défauts d'alignement, de l'ordre de 1/1000 rad. Habituellement, les roulements à une rangée de billes ne sont pas démontables.

Dérivées et variantes : ces roulements sont en général montés par paires en opposition. Dérivent aussi les roulements à contact oblique à une rangée de billes démontables, roulements appariés, roulements à contact oblique à deux rangées de billes.

Commentaires : ---

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à billes à deux rangées de billes à contact oblique

12. *Roulement à deux rangées de billes à contact oblique.*

13. *Schématisation.*

Type de contact : contact ponctuel

Elément roulant : billes (2 rangées)

Chemin de roulement : le chemin de roulement cylindrique de la bague intérieur comporte deux épaulements. Grâce aux deux épaulements situés entre les billes de la bague extérieure , le contact est oblique.

Utilisations principales : réducteur, roues avant d'automobiles, réducteur, matériel agricole.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * * * * (9/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * * (6/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * * * (6/12)

Rotulage admissible : * (1/12)

Montage et démontage : en général l'angle de contact est de 32°, mais il existe également des roulements obliques à 15°, 25° voire 40°. De plus la construction est telle qu'ils ne permettent que de très faibles défauts d'alignement, de l'ordre de 1/1000 rad.

Dérivées et variantes : ---

Commentaires : à l'origine, les roulements à deux rangées de billes à contact oblique ont trouvé leur principale utilisation dans des montages où les déformations élastiques devaient être aussi faibles que possible sous des charges importantes et variables. Ce qui justifiait le jeu voisin de zéro. Actuellement, d'autres types de roulement peuvent les remplacer dans ce genre d'application. Ils ont pris davantage d'importance dans les montages de mécanique générale.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à rotule sur deux rangées de billes

14. *Roulement à rotule sur deux rangées de billes.*

15. *Schématisation.*

Type de contact : contact ponctuel

Elément roulant : billes (2 rangées)

Chemin de roulement : les billes roulent sur deux pistes de la bague intérieure et dans la même piste sphérique de la bague extérieure.

Utilisations principales : arbres longs et flexibles, paliers de transmission, ventilateurs centrifuges.

Aptitude aux charges axiales : * (1/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * (4/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * * * * * * (9/12)

Rotulage admissible : * * * * * * * * * * * (11/12)

Montage et démontage : grâce à sa construction, la bague intérieure et son jeu de billes peuvent osciller autour du centre du roulement, faculté importante au montage lorsqu'il est difficile d'obtenir un parallélisme rigoureux entre l'arbre et le logement (2 à 3 degrés).

Dérivées et variantes : ce roulement existe avec alésage cylindrique ou conique pour montage avec manchon de serrage.

Commentaires : le contact des billes avec la piste de la bague extérieure est moins favorable que dans un roulement rigide et la capacité de charge est donc relativement moins grande.

14a. *Roulement à rotule sur deux rangées de billes avec manchon de serrage.*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à rotule sur deux rangées de rouleaux

16. *Roulement à rotule sur deux rangées de rouleaux.*

17. *Schématisation.*

Type de contact : contact linéaire

Elément roulant : rouleaux tonneaux (2 rangées)

Chemin de roulement : les rouleaux s'appuient contre les deux chemins sphériques du roulement et qui permettent le rotulage.

Utilisations principales : gros réducteurs, ventilateur industriel, cage de laminoir, machine de carrière, boîtes d'essieux pour matériel ferroviaire, lignes d'arbre de navires, laminoirs, paliers de transmission, broyeurs, concasseurs, cylindre de machine à imprimer.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * (6/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * * * * * * * (11/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * (4/12)

Rotulage admissible : * * * * * * * * * (9/12)

Montage et démontage : ---

Dérivées et variantes : existent aussi les roulements de type large dans lesquels un épaulement assure le guidage des rouleaux entre les deux chemins de la bague intérieure. Les rouleaux s'appuient alors contre le chemin de roulement de la bague intérieure suivant un contact linéaire et contre le chemin de la bague extérieure suivant un contact ponctuel. Ce roulement existe aussi avec alésage conique pour montage avec manchon de serrage.

Commentaires : ce roulement est exécuté suivant le même principe que le roulement à rotule sur deux rangées de billes.

16a. *Roulements à rotule sur deux rangées de rouleaux avec manchon de serrage.*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à une rangée de rouleaux cylindriques

18. *Roulement à une rangée de rouleaux cylindrique type NU.*

19. *Schématisation.*

Type de contact : contact linéaire

Elément roulant : rouleaux cylindriques (1 rangée)

Chemin de roulement : les bagues possèdent des chemins cylindrique. L'une des deux bagues peut avoir des épaulement latéraux qui bloquent le rouleau suivant le type (N, NU, NJ, NUP).

Utilisations principales : moteurs électriques, turbo-compresseurs, ventilateurs, boîtes de vitesses, galet de pression, cylindre de laminoir.

Aptitude aux charges axiales : * * (2/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * * * * * * (10/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * * * * * * (9/12)

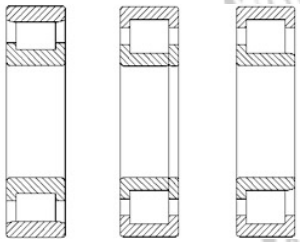
Rotulage admissible : * * (2/12)

Montage et démontage : dans les exécutions les plus courantes, il permet le déplacement axial d'une bague par rapport à l'autre. Ceci est intéressant dans le cas où l'arbre se dilate sous l'effet de variations de température et également pour le montage et le démontage, en particulier si les conditions de fonctionnement nécessitent un ajustement serré sur l'arbre et dans le logement.

Dérivées et variantes : il existe aussi les types N, NU, NJ, NUP dont la conception des bagues diffèrent, ces diverses exécutions diffèrent par le nombre et la position des épaulements latéraux des bagues. Il existe aussi les roulements à deux rangées de rouleaux cylindriques qui offrent une grande capacité de charge radiale et une faible déformation élastique. Dérive aussi de ce roulement les roulements à aiguilles.

Commentaires : ---

20. *Roulement à une rangée de rouleaux cylindriques types N, NJ, NUP.*



21. *Schématisations.*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulements à rouleaux coniques

22. *Roulement à rouleaux coniques.*

23. *Schématisation.*

Type de contact : contact linéaire

Elément roulant : rouleaux coniques (1 rangée)

Chemin de roulement : la grande base des rouleaux est rectifiée ; sphérique, s'appuie contre un épaulement de la bague intérieure. Les génératrices des rouleaux et du chemin de roulement de la bague intérieure ont un même sommet sur l'axe du roulement.

Utilisations principales : machines-outils, arbre de réducteurs, roue de poids lourds, pont d'automobiles, roues folles de wagonnets, renvoi d'angle à pignon conique.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * * * * * * (11/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * * * * * * * (9/12)

Vitesse limite de rotation : * * * * (4/12)

Rotulage admissible : * * (2/12)

Montage et démontage : ces roulements sont en général montés par paires en opposition. De plus après réglage, il faut qu'un certain jeu minime subsiste, les variations de température influençant le réglage et donc le jeu.

Dérivées et variantes : ---

Commentaires : la bague extérieure, appelée cuvette, est démontable. La bague intérieure avec sa cage et ses rouleaux est aussi appelée cône.

22a. *Roulements à rouleaux coniques à collerette.*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Butées à billes à simple effet

24. *Butée à billes à simple effet.*

25. *Schématisation.*

Type de contact : contact ponctuel

Elément roulant : billes (1 rangée)

Chemin de roulement : la rondelle-logement à surface d'appui plate est préférée mais cette rondelle peut être sphérique et repose dans ce cas sur une contreplaque sphérique.

Utilisations principales : arbres verticaux, crapaudines, réducteurs de vitesse, pivots, machines-outils, contre-pointe, pompe à plateaux.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * * * * * * (11/12)

Aptitude aux charges radiales : (0/12)

Vitesse limite de rotation : * * (2/12)

Rotulage admissible : * (1/12)

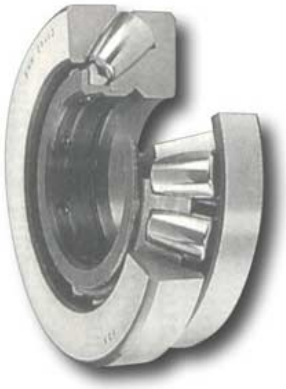
Montage et démontage : les possibilités d'alignement de la rondelle sphérique n'interviennent qu'au montage.

Dérivées et variantes : la butée à billes à double effet comprend deux jeux de billes pris en " sandwich " entre deux rondelles logement et une rondelle arbre ou rondelle médiane. Cette butée peut transmettre les efforts axiaux dans un sens ou dans l'autre.

Commentaires : les butées à billes simple effet ne peuvent transmettre des efforts axiaux que dans un seul sens.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Butées à rotule sur rouleaux



26. *Butée à rotule sur rouleaux.*

27. *Schématisation.*

Type de contact : contact linéaire

Elément roulant : billes (1 rangée)

Chemin de roulement : rondelle-logement à chemin sphérique.

Utilisations principales : arbre vertical lourd, turboalternateur, pivot de grue, vis d'injection d'extrudeuse, pivots de turbines, ponts tournants, réducteurs à vis sans fin.

Aptitude aux charges axiales : * * * * * * * * * * * (11/12)

Aptitude aux charges radiales : * * * (3/12)

Vitesse limite de rotation : * (1/12)

Rotulage admissible : * * * * * * * * * * * (11/12)

Montage et démontage : ---

Dérivées et variantes : ---

Commentaires : ce type de butée supporte des vitesses assez élevées à condition que la lubrification soit parfaite (lubrification à l'huile).

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

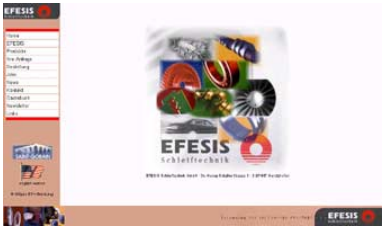
Fabricants de roulements

Pour finir sur ces pré-requis, on peut citer non exhaustivement les principaux fabricants dans le monde (par ordre alphabétique):

B.M.R.

GENERAL MOTORS

EFESIS



I.N.A.

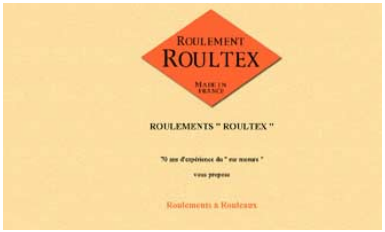
F.A.G.

I.S.O.

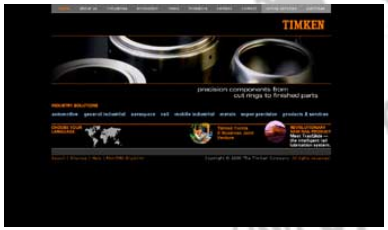
NADELLA

S.N.R.

ROULTEX



TIMKEN



S.K.F.

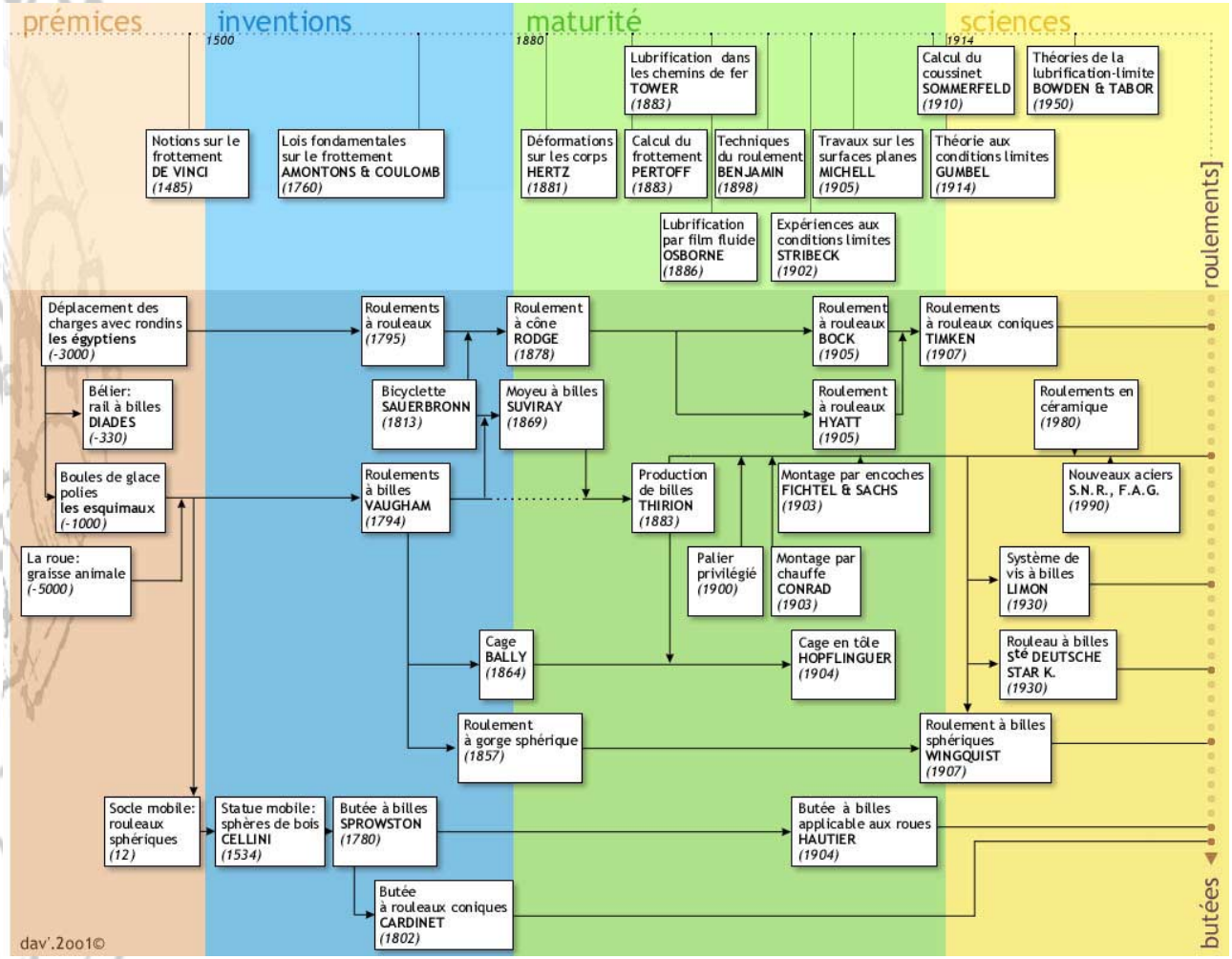
TORRINGTON

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

mémoire

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Génétique du roulement


prémices
inventions
maturité
sciences
1500
1880
1914
Notions sur le frottement DE VINCI (1485)
Lois fondamentales sur le frottement AMONTONS & COULOMB (1760)
Déformations sur les corps HERTZ (1881)
Lubrification dans les chemins de fer TOWER (1883)
Calcul du frottement PERTOFF (1883)
Techniques du roulement BENJAMIN (1898)
Travaux sur les surfaces planes MICHELL (1905)
Théorie aux conditions limites GUMBEL (1914)
Lubrification par film fluide OSBORNE (1886)
Expériences aux conditions limites STRIBECK (1902)
Calcul du coussinet SOMMERFELD (1910)
Théories de la lubrification-limite BOWDEN & TABOR (1950)
roulements
Déplacement des charges avec rondins les égyptiens (-3000)
Bélier: rail à billes DIADES (-330)
Boules de glace polies les esquimaux (-1000)
La roue: graisse animale (-5000)
Roulements à rouleaux (1795)
Bicyclette SAUERBRONN (1813)
Roulement à cône RODGE (1878)
Moyeu à billes SUVIRAY (1869)
Roulements à billes VAUGHAM (1794)
Production de billes THIRION (1883)
Palier privilégié (1900)
Montage par encoches FICHTEL & SACHS (1903)
Montage par chauffe CONRAD (1903)
Roulement à rouleaux BOCK (1905)
Roulement à rouleaux HYATT (1905)
Roulements à rouleaux coniques TIMKEN (1907)
Roulements en céramique (1980)
Nouveaux aciers S.N.R., F.A.G. (1990)
Système de vis à billes LIMON (1930)
Rouleau à billes sté DEUTSCHE STAR K. (1930)
Cage BALLY (1864)
Cage en tôle HOPFLINGUER (1904)
Roulement à gorge sphérique (1857)
Roulement à billes sphériques WINGQUIST (1907)
Socle mobile: rouleaux sphériques (12)
Statue mobile: sphères de bois CELLINI (1534)
Butée à billes SPROWSTON (1780)
Butée à billes applicable aux roues HAUTIER (1904)
Butée à rouleaux coniques CARDINET (1802)
butées
dav'.2oo1©

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

De l'importance de la roue

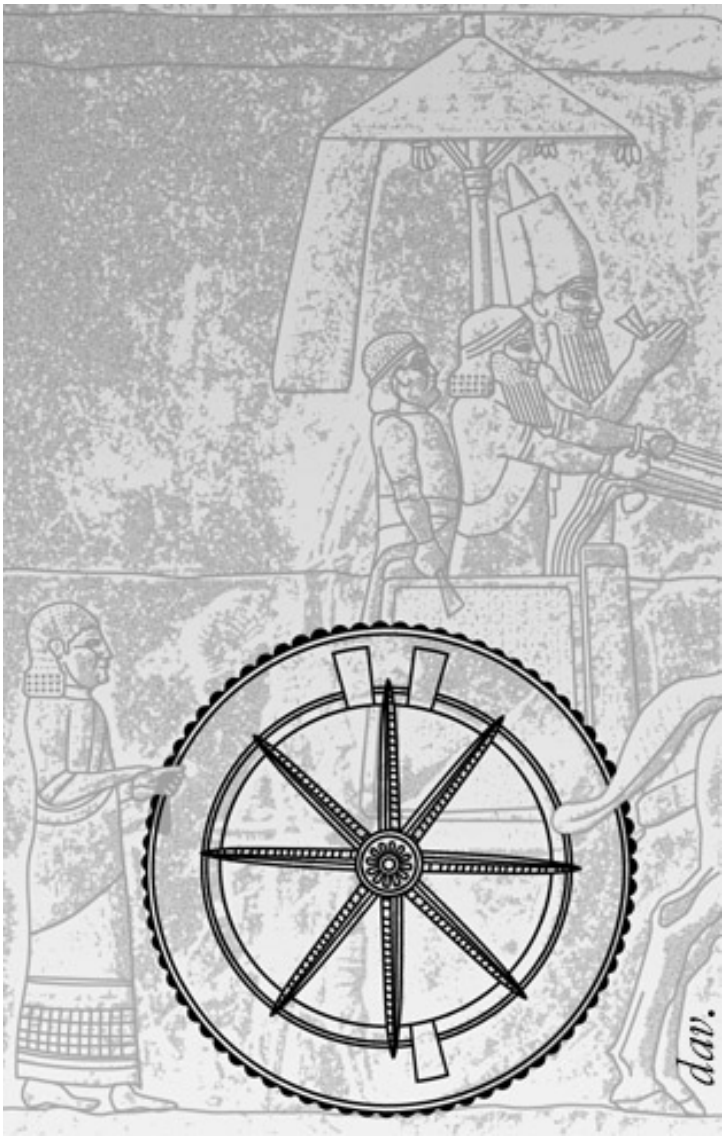
" La roue, dont aucun exemple ne se rencontre dans la nature, reste une des plus grandes inventions de tous les temps. Utilisée pour la première fois, il y a 5 000 ans, en Mésopotamie, elle réduit le frottement entre une charge mobile et le sol. Une surface, au lieu de glisser, roule sur l'autre. "

(dictionnaire de vulgarisation des techniques)

28. *Peinture murale d'une tombe égyptienne décrivant la confection d'un chariot à quatre roues (1500 av. J.-C.).*

Les chars préhistoriques dont nous possédons des reproductions étaient munis de roues pleines montées sur un axe, ce dernier tournant lui-même sous le plancher du char. Puis, progrès sensible, l'axe est maintenu fixe, et ce sont les roues, indépendantes, qui tournent autour de lui. La roue, à l'origine disque de bois plein, se perfectionna rapidement. Aux environs de l'an 2 000 avant J.-C., des roues à la fois plus robustes et plus légères, composées d'un moyeu au centre, d'un cercle extérieur et de rais reliant les deux pièces, se répandirent à travers le Moyen-Orient *(fig 28, fig 29)*. Cette conception n'a pas évolué depuis.

L'invention de la roue permit à l'humanité de faire un immense bond en avant, tant technique qu'économique et social.



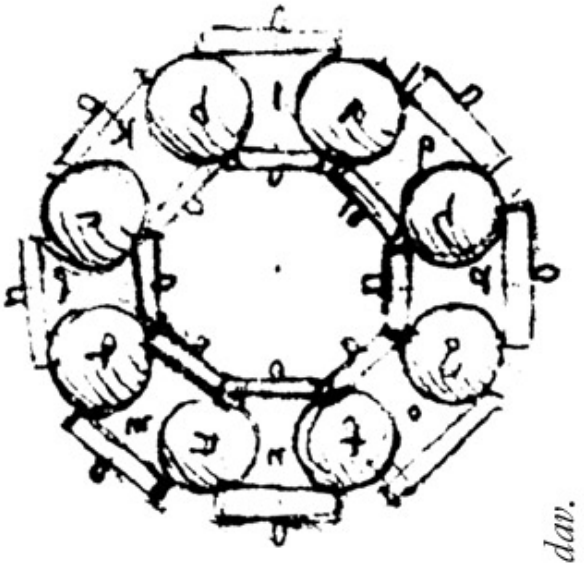
29. *Bas-relief (art assyrien).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Une roue en rotation tourne sur l'essieu qui la traverse en son centre. Le point où la roue est traversée par l'essieu est la fusée. La roue permit donc de transporter des charges plus lourdes en se servant d'un système de pivot. Un mécanisme simple - une roue pivotant autour d'un axe fixe - permettait de réduire considérablement les efforts à appliquer pour déplacer l'engin ainsi équipé, mais continuait de présenter des inconvénients importants.

Lorsque la roue tourne, l'essieu est fixe et le moyeu de la roue frotte sur la fusée d'essieu. Si le moyeu tourne vite, les pièces chauffent : les frottements freine la rotation de la roue provoquant une usure rapide des composants du pivot. Pour faciliter le glissement du moyeu sur l'essieu, on garnissait alors le joint de graisse ou d'huile d'origine animale ou végétale.

Ces forces de frottement et leur étude n'ont été abordées que vers 1485 par Léonard de Vinci. Dans les nombreux manuscrits et croquis qu'il nous a laissés, notamment dans le codex de Madrid I (f 20v) *(fig 30)*, il est fait état d'une distinction entre le frottement des solides et le frottement des liquides. De plus, il formule l'idée de frottement de glissement, opposé à celui de pivotement. Ses études ont très certainement contribué à améliorer une des premières solutions utilisées pour pallier les frottements liés à la rotation de la roue autour de son axe : la lubrification. Celle-ci permet de réduire les frottements entre les pièces en contact en interposant un film fluide, diminuant ainsi leur usure et les efforts déployés. La vitesse de rotation, pourtant très étudiée, restait limitée et les pertes d'énergie dues au réchauffement demeuraient importantes. Outre le problème de la lubrification, Léonard de Vinci a fort probablement remarqué la nécessité d'un bon état des surfaces qui sont mises en contact car il conseille un très grand soin dans leur réalisation. Malgré ses recherches et ses croquis proposant ainsi des améliorations possibles, la roue, dans sa conception primitive avec son pivot lubrifié, allait connaître peu d'évolutions jusqu'à la révolution industrielle.



30. *Croquis de roulement, Léonard De Vinci (1500).*

Un des problèmes les mieux pressentis, à part la lubrification, a été celui de l'adaptation de matériaux de l'assemblage roue/axe. Les frictions et les pressions exercées au niveau du contact faisaient bien souvent céder l'un des deux éléments; un troisième composant s'est donc avéré nécessaire pour permettre une remise en état. Une telle réalisation a été rendue possible par les évolutions progressives des matériaux employés. Du bois et de la pierre, on est passé au métal. La métallurgie permit la fabrication d'un intermédiaire entre l'axe et la roue. Les caractéristiques d'un tel élément devaient être un faible encombrement - pour pouvoir se glisser entre l'axe et la roue - et une bonne résistance à la charge de l'assemblage ainsi constitué, de manière à le rendre performant. Le palier lisse était né et remplissait les fonctions requises - réduction des frottements, résistance aux charges -, mais servait également de guidage.

Il faut noter la réalisation de paliers en bronze coulé à la fin de la Renaissance, liés aux progrès de la métallurgie de cet alliage. A l'époque de la révolution industrielle, des paliers de plus en plus performants devinrent nécessaires pour éviter les frictions dans les machines, partout où une rotation était présente ...

Le développement parallèle de la lubrification

" La lubrification est un élément essentiel des sciences technologiques et des applications mécaniques. Elle joue un rôle important partout où des surfaces sont en mouvement relatif les unes par rapport aux autres. Tous les systèmes mécaniques comportent, plus ou moins, des éléments lubrifiés. On peut dire, sans exagération, que bien peu de sujets ont une incidence aussi importante sur les travaux des ingénieurs... Ceci implique des recherches plus poussées dans le domaine de la lubrification elle-même, une formation plus répandue et plus approfondie en matière de lubrification... et une prise de conscience plus générale du potentiel important que présente ce problème, dans tous les domaines de l'industrie. "

(Sté Française des Pétroles BP.- La théorie de la lubrification et ses applications. 1974)

31. *Palier graissé (1970).*

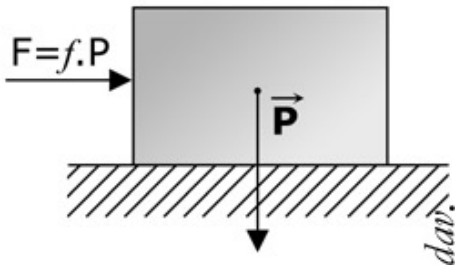
Ce passage est extrait d'un rapport publié en 1966 par le *" Department of Education and Science "* de Londres, intitulé *" Lubrification (Tribology) Education and Research "* qui estimait que l'emploi de méthodes et de techniques de lubrification inadéquates, faisait subir à l'économie, pour le Royaume-Uni, une perte annuelle de plus de £ 500 millions. En fait, bien que ce rapport ne concerne que le Royaume-Uni, sa conclusion s'applique à peu près à tous les pays du monde.

Lorsque deux surfaces solides en contact glissent l'une par rapport à l'autre, il se produit frottement (produit par la résistance des surfaces au mouvement) et usure (destruction du matériau résultant du frottement) . Phénomènes nuisibles pour la majorité des mécanismes soumis au glissement (glissières et paliers en particulier), ils peuvent être presque entièrement éliminés si l'on empêche le contact des surfaces en mouvement. Interposé entre deux surfaces frottantes, le lubrifiant permet donc de réduire le coefficient de frottement et l'effort à produire. D'une façon générale et l'histoire nous le confirme : toute substance solide, liquide ou gazeuse interposée, peut être appelée un lubrifiant potentiel.

(propos à nuancer car le lubrifiant supportant seul le déplacement latéral, il doit avoir une faible résistance au cisaillement et doit aussi pouvoir éliminer la chaleur de frottement qui réduit la puissance).

Nous allons voir dans l'historique qui va suivre, que le développement de la lubrification est très fortement lié à celui des paliers puis des roulements. La période de pleine expansion scientifique correspondant à la même période que celle du développement industriel des paliers *(fig 31)*, à la fin du XIXe siècle et dans les années 1900.

La technique de la lubrification-limite a été systématiquement utilisée depuis des temps très anciens. Elle remonte au moins à l'époque où les Egyptiens se servaient de suif pour graisser les essieux des chars et des chariots. Les lubrifiants provenaient presque exclusivement de graisses animales (suif, par exemple) ou d'huiles végétales (huile d'olive). Des lubrifiants solides appliqués par " fartage " (graphite, talc) étaient aussi employés à un degré restreint. L'emploi judicieux des lubrifiants pour lubrification-limite réduisait considérablement le frottement et l'usure dans les machines primitives où les vitesses de glissement étaient faibles et qui ne fonctionnaient que pendant des périodes relativement courtes.



32. *Schématisation classique du problème de frottement.*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Nous avons vu que les ingénieurs de la Renaissance, notamment Léonard de Vinci s'étaient préoccupé d'analyser cette question des frottements mécaniques. A leur suite, au XVIIIe siècle, les physiciens français Amontons et Coulomb ont mesuré la force F nécessaire pour obtenir le début du déplacement d'un corps reposant sur une surface *(fig 32)* et supportant une charge P (par exemple le poids P). Ils ont constaté qu'il fallait lui appliquer une certaine force F proportionnelle à la charge P. Le coefficient de proportionnalité est le coefficient de frottement f, il leur vient alors la loi célèbre régissant le frottement : F = f x P.

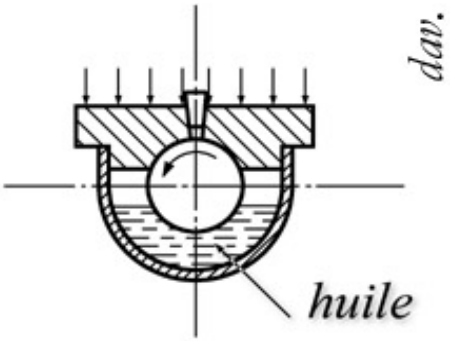
(On a cru pendant longtemps que cette loi était applicable aux paliers, on y évaluait F en attribuant à f une valeur constante; on pensait que l'arbre tournait dans le coussinet avec plus ou moins de contacts métalliques et on adoptait pour f une valeur assez élevée, plusieurs centièmes)

L'invention de la machine à vapeur, dans laquelle les surfaces frottantes étaient soumises à un mouvement relatif rapide, donna lentement essor à une technique de lubrification bien améliorée et inexploitée jusque-là, dans laquelle les éléments des paliers et glissières ne se trouvaient plus en contact occasionnel, comme dans le cas de la lubrification-limite, mais étaient isolés les uns des autres par un film fluide, assez épais pour empêcher tout contact. On s'aperçut bien vite que, pour être totalement bénéfique, ce mode de lubrification nécessitait l'emploi de quantités abondantes de lubrifiant, des vitesses de glissement élevées et que la conception des paliers devait être conforme à une géométrie permettant la formation d'un " coin " de lubrifiant qui converge dans la direction du mouvement. Des techniques d'usinage des métaux considérablement améliorées et la découverte vers le milieu du XIXe siècle, d'abondantes réserves d'huile minérale résolurent ces problèmes et mirent les paliers hydrodynamiques à la portée des transports et de l'industrie.

En 1883, Petroff dans le *Bulletin de l'Académie des Sciences de Saint-Pétersbourg*, a le premier traité par le calcul le problème du frottement dans les paliers en tenant compte de la viscosité du lubrifiant. Il supposait que l'arbre et le coussinet sont concentriques, et déterminait l'effort de frottement par application de la loi de Coulomb. Puisqu'il s'agit de surfaces parallèles, son raisonnement n'était correct que dans le cas limite d'une charge nulle; en somme, il était le premier à utiliser les forces de viscosité dans l'analyse du frottement lubrifié, mais il n'avait pas découvert les lois que l'hydrodynamique permet de formuler quant à l'existence de la couche fluide et son conditionnement; nous dirons qu'il n'avait pas découvert le " secret " de la force portante du film.

Néanmoins, si imparfaite que soit sa théorie, elle ne s'éloignait pas tellement de la vérité en ce qui concerne la valeur de l'effort de frottement. Par contre, elle était totalement fausse en ce qui concerne l'épaisseur du film ;et pour cause, elle ignorait la loi de répartition des pressions (travaux basés en fait sur l'existence d'un film d'huile d'épaisseur variable dans un palier excentré). De plus, puisqu'elle attribuait à l'épaisseur du film une valeur constante égale au jeu, elle devait être complètement déroutée par l'apparition, dans le palier, des coefficients de frottement élevés qui se manifestent quand la vitesse tangentielle de l'arbre, entre autres, descend en dessous d'une certaine valeur.

En fait, c'est un accident de laboratoire qui a conduit en Angleterre à la découverte des lois exactes du frottement hydrodynamique sans que la théorie de Petroff y ait été connue. Le mécanisme de la lubrification par film épais fut alors réellement connu et les principes théoriques furent exprimés mathématiquement. La théorie de la lubrification en régime hydrodynamique est alors basée sur les travaux expérimentaux de Beauchamp Tower qui fit des recherches pour l'*Institution of Mechanical Engineers* à Londres en 1883 afin de mettre au point des méthodes convenant à la lubrification des essieux de chemin de fer. Une de ses expérimentations-phares résidait dans un coussinet, d'environ 160° d'arc *(fig 33)* qui portait sur l'essieu et qui devait être alimenté en lubrifiant par l'essieu lui-même plongeant dans un bain d'huile.



33. *Coussinet de 160°, expérience de Tower (1883).*

Un trou pratiqué au cours d'essais antérieurs sur la génératrice supérieure, n'ayant plus de raison d'être, avait été obturé par un bouchon de liège; dès la mise en rotation de l'essieu, le bouchon fut projeté hors de son logement. Tower ayant fait remplacer ce bouchon par une broche en bois bien calée, celle-ci fut lentement expulsée. Il eut alors l'idée de brancher un manomètre sur le trou, et fut surpris de constater que le manomètre gradué jusqu'à 200 livres par pouce carré (environ 14 bars), était nettement insuffisant pour mesurer la pression alors que la charge unitaire du palier n'était que de 100 livres par pouce carré (7 bars). Il releva alors les courbes de pression suivant une série de génératrices et de sections transversales, et publia les résultats de ses travaux.

Partant des résultats expérimentaux de Tower, Osborne Reynolds découvrit les lois qui régissent le phénomène, et en 1886, il publiait sa célèbre théorie sur la lubrification par film fluide : *On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments* dont l'importance ne fut toutefois pas immédiatement comprise. La théorie hydrodynamique de la lubrification était née. Cependant Reynolds, parce qu'il analysait le cas expérimental de Tower, n'avait établi que la théorie du demi-coussinet, et, pour résoudre les équations différentielles qu'il avait obtenues, avait fait des développements en série peu rapidement convergents qui conduisaient à des résultats d'expression complexe et assez obscurs.

La théorie mathématique fut développée plus à fond par Sommerfeld en 1904 et par l' ingénieur australien Michell en 1905. Les travaux de ce dernier portant principalement sur les surfaces planes, telles qu'elles se présentent dans les paliers de butée. C'est à Sommerfeld qu'il revient d'avoir réussi à étudier analytiquement à l'aide d'une intégrale définie, le cas du coussinet complet et du demi-coussinet et d'être parvenu à formuler les résultats du calcul d'une manière suffisamment simple et claire. Toutefois, dans la plupart des cas, la théorie de Sommerfeld péchait par les conditions limites qu'il avait adoptées, et il fallut attendre les recherches théoriques de Gümbel, de 1914 à 1922 pour disposer enfin d'une théorie ayant acquis sa forme définitive.

Parmi les expérimentateurs dont le travail a orienté les conceptions de Gümbel, on peut citer tout particulièrement l'Allemand Stribeck (1902) et les travaux d'une série de chercheurs qui ont confirmé leur valeur par l'expérience, notamment à Hanocq à l'Université de Liège.

Les premières études méthodiques du mécanisme de la lubrification par film mince furent effectuées par Hardy en 1920 qui employa d'abord le terme de " Lubrification-limite ". Ses travaux furent poursuivis et considérablement développés par Bowden et Tabor en 1950 ; ils présentèrent des théories sur le régime de lubrification-limite et le frottement, largement reconnues à notre époque.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

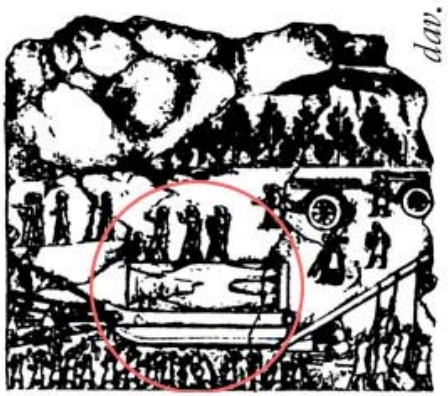
Histoire de roulements

" Dès l'Antiquité, l'homme eut à affronter les forces de la nature. Et il s'aperçut bien vite que, pour déplacer de lourdes charges, sa force, ou même celle des animaux qu'il avait domestiqués, était insuffisante. Il contourna la difficulté principale - le frottement des matériaux - en substituant le roulement au frottement de glissement. Il plaça des rouleaux de bois sous les patins des traîneaux. L'ancêtre du roulement venait d'apparaître… "

(Ecole Polytechnique.- Paliers graisseurs et boites à huile, portefeuille des élèves. 1880)

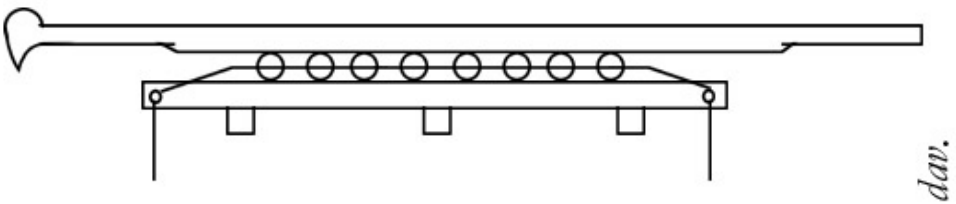
Selon certains récits d'esquimaux recueillis par les premiers voyageurs qui découvrirent les étendues glacées polaires, il aurait été fait usage pour déplacer de lourdes charges, de traîneaux munis de galets de roulement en os de phoque; avant de mettre en marche ces véhicules rudimentaires les conducteurs les retournaient, emplissaient leur bouche d'eau et la crachaient le long des galets. Ainsi, ils supprimaient le dernier rempart au déplacement : la surface de contact entre le traîneau et le sol de glace. L'eau emplissait les cavités de ces rouleaux et glaçait; après quoi les galets incrustés de glace étaient polis avec des gants jusque ce que soit obtenue une surface lisse. C'est ainsi que ces peuplades traduisaient de façon concrète la notion qu'ils avaient de la possibilité de diminuer la résistance de corps se déplaçant sur le sol par l'emploi d'organes de roulement, présentant ce que les techniciens modernes appelleraient un coefficient de frottement minimum.

La cinquième dynastie égyptienne - environ 3000 ans avant J.C. - nous a laissé mention de l'usage de roues. Plus tard, un bas relief retrouvé dans ce qui fut l'ancienne ville de Ninive, nous montre l'usage de rouleaux pour le déplacement de grosses pierres ; les Assyriens comme les Égyptiens utilisèrent certainement cette méthode pour transporter les lourds matériaux nécessaires à la construction de leurs nombreux édifices *(fig 34)*.



34. *Transport d'un taureau ailé au moyen de rouleaux (- 680 av. J.-C.).*

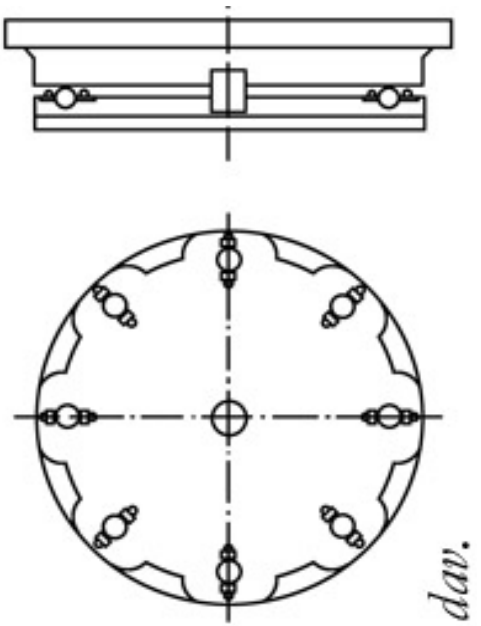
Mais la première machine dans laquelle l'emploi de galets revêt un caractère purement organique semble bien être celle réalisée vers l'An 330 avant J.C. par Diades qui fut en quelque sorte l'ingénieur en chef de fabrication d'armements d'Alexandre Le Grand. Cet ingénieur avait conçu un bélier dont le mouvement était commandé par des roulements placés dans des gorges et maintenus à des distances fixes les uns des autres, à leur extrémité, par une sorte de cage *(fig 35)*. Le bélier était mis en action par des manœuvres qui tiraient sur des câbles attachés à chaque extrémité de la cage et passant sur des poulies folles fixées aux extrémités du socle fixe du bélier.



35. *Bélier monté sur " rail à billes " (-330 av. J.-C.).*

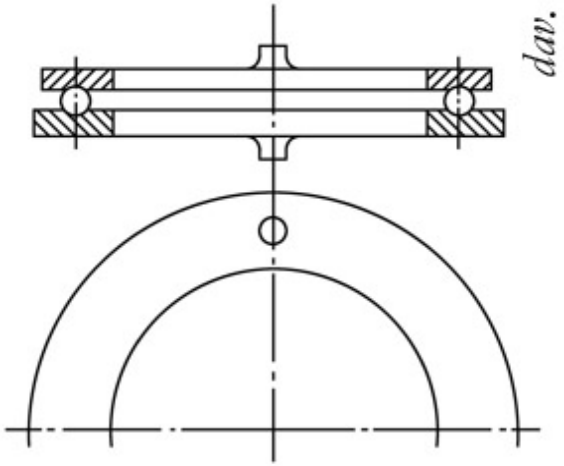
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Un deuxième exemple d'application mécanique du roulement et qui nous rapproche davantage des roulements modernes, remonte à l'époque de Caligula, de l'an 12 à l'an 41 de notre ère. En drainant le lac Nemi en 1928 un certain nombre de reliques datant de cette époque furent retrouvées dans deux vaisseaux. Entre autres objets on remarqua un socle supportant, par l'intermédiaire de rouleaux sphériques prolongés par des tourillons, un plateau rotatif ; un socle mobile de statue équipé par ce qui peut être considéré comme un des premiers dispositifs d'orientation à billes *(fig 36)*. Des évidements en forme de calottes sphériques étaient creusés dans le disque supérieur et les tourillons des billes étaient soutenus par des bandes de cuivre cousues à la partie inférieure de ce disque. Les disques étaient en bois et les roulements en bronze. Ceux-ci constituent sans doute le premier exemple d'organe de roulements de forme sphérique, bien qu'en l'occurrence les tourillons aident à supporter la charge et qu'il n'y ait pas à proprement parler de roulement parfait comme dans les butées à billes modernes.



36. *Reconstitution de la butée retrouvée dans la galère de Caligula (12 ap. J.-C.).*

S'il faut remonter dans l'histoire de la civilisation moderne à Léonard De Vinci, en 1485, pour dégager les notions de frottement de glissement et de frottement de roulement, ce n'est que beaucoup plus tard, en 1534, qu'il est fait mention de roulements à billes dans les mémoires de Benvenuto Cellini un orfèvre florentin, auquel François 1er commanda une statue en argent de Jupiter d'environ cinq pieds et demi de haut. *" Ayant terminé avec une extrême diligence la splendide statue de Jupiter, je la plaçai sur un socle de bois, et sur ce socle je fixai quatre petites sphères de bois enfoncées de plus de moitié dans des logements creusés dans ce socle, et disposées si bien qu'un petit enfant pouvait avec la plus grande facilité, mouvoir cette statue en avant et en arrière ou en tournant sur elle-même. " (fig 37)*

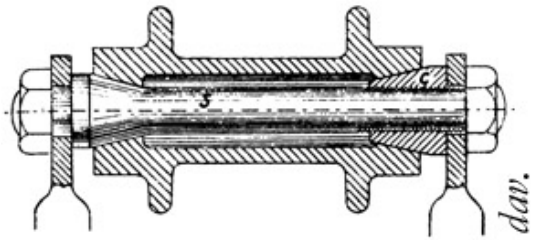


37. *Socle de la statue de Jupiter (1534).*

En 1714, le Bureau des longitudes de Londres offrit de nombreux prix pour la mise au point d'une méthode permettant de déterminer en mer la longitude d'un point à moins de 1 degré d'arc près. L'un des gagnants de ce concours fut Henri Sully, qui réalisa un chronomètre d'une grande précision, obtenue en partie par l'emploi de roulements. C'est là la première application du principe de ces mécanismes à un instrument scientifique. Dans le même ordre d'applications, en 1720, Atwood utilisa également des roulements dans son instrument de mesure de l'accélération de la pesanteur. On peut citer l'exemple de la pendule anglaise *" Eureka "*, reconnaissable à son important balancier dont les pivots sont portés par un roulement à billes, il s'agit là de la première application connue du roulement à billes dans l'horlogerie.

Coulomb en 1760 dégage des travaux de Léonard De Vinci les lois fondamentales du frottement. Un peu plus tard apparaissent les véritables prototypes de nos roulements actuels. D'abord, en 1780, est construite la première des butées à billes modernes, qui supporte l'arbre principal du moulin de Sprowston, dans le Norwich, en Angleterre. Un point intéressant à noter est le suivant : le diamètre du cercle générateur du tore dans lequel roulent les billes n'est pas le même que celui des billes mais plus grand : 1,22 fois plus grand. Un peu plus tard en 1794 apparaît le premier brevet couvrant un roulement à billes destiné à supporter des charges radiales et déposé par l'Anglais Philippe Vaugham, il sera employé pour les essieux de voiture.

Le brevet du moyeu à billes est pris en 1869, le français Jules Pierre Suviray dépose les dessins et la description d'un dispositif d'application du roulement à billes aux axes des roues d'un véhicule, puis viennent tous les perfectionnements aux moyeux des vélos dont celui de Rodge en 1878, qui est l'origine du roulement dit à cône *(fig 38)* et cuvette. L'efficacité des roulements exige une fabrication très minutieuse et il est très difficile à l'époque d'obtenir des rouleaux ou des billes de même taille pour permettre un bon fonctionnement de l'ensemble. Il faudra attendre 1883, pour que la popularité de la bicyclette - brevets de l'Écossais A.L. Thirion au milieu du XIXe siècle - permette à la production de billes en acier de devenir une véritable industrie et d'atteindre la qualité requise. En même temps les constructeurs commencent à procéder à des recherches théoriques et expérimentales relatives à la construction des roulements, celles-ci permirent de résoudre les problèmes de fabrication qui freinaient le développement de ce composant indispensable. De son côté, l'Allemand Heinrich Hertz effectue ses travaux théoriques de sur les déformations des corps en 1881.

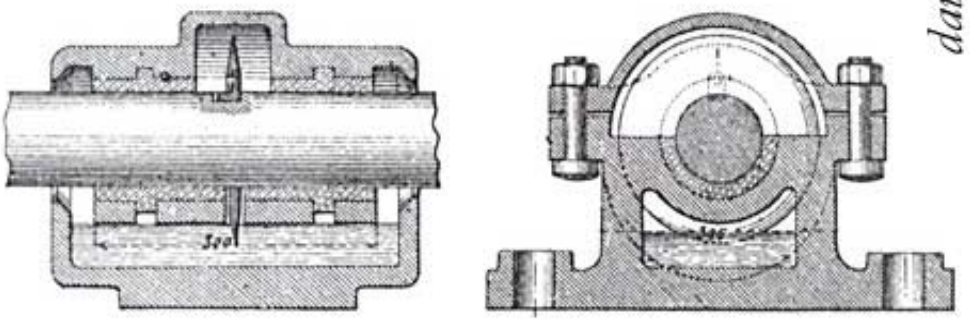


38. *Roulement à cône d'essieu de vélo (1878).*

A côté de l'intégration des roulements au vélo, et en marge des intégrations industrielles qui ne constituent pas en elles des applications " sociales " du roulement, on peut noter l'exemple du patin à roulettes. Crée en 1770 grâce à Joseph Merlin, un inventeur belge excentrique, les patins peinaient à décoller. Perfectionnés progressivement en 1819, par Petitbled qui invente le patin à " arrêtoir " puis en 1823 par Tyers qui met en place l'ancêtre du patin en ligne, enfin en 1828 par Jean Garcin qui installe une tige pour maintenir la cheville. Cependant, le patin se retrouvait dans la problématique arbre/moyeu … c'est tout naturellement le roulement à billes qui sera la solution et qui fera se déchaîner véritablement les patineurs.

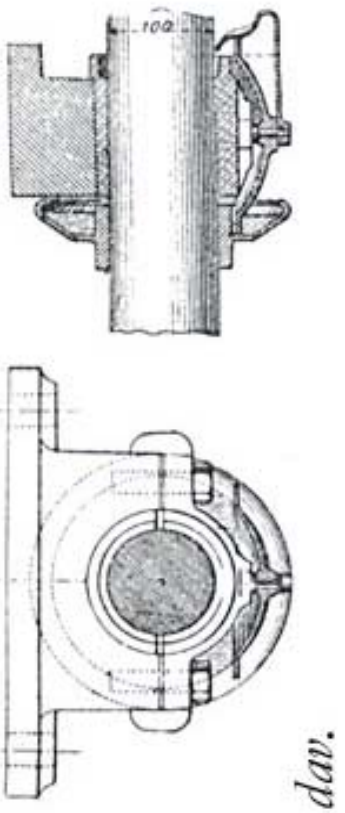
Un article, paru en décembre 1898 dans la revue américaine *" The Pratical Engineer "*, sous le signature de C.J. Benjamin, fera le point, d'une manière très intéressante, des connaissances sur la technique des roulements recueillies à l'époque posant déjà les véritables fondements de ce qui deviendra l'industrie du roulement *(les extraits traduits de The Practical Engineer en annexe permettront de s'en donner une idée)*. On voit ainsi qu'à la fin du dernier siècle la technique du roulement n'en est qu'à ses prémices.

Cependant, à la même époque, alors que les techniques du roulement se précisent et même si le coefficient de frottement d'où roulement à billes est environ le dixième de celui des meilleurs paliers lisses, l'intermédiaire privilégié entre l'arbre et l'alésage reste quand même le palier (cf. étude des grands exemples). Des paliers de plus en plus performants deviennent nécessaires pour éviter les frictions dans les machines *(fig 39, fig 40, fig 41)*.

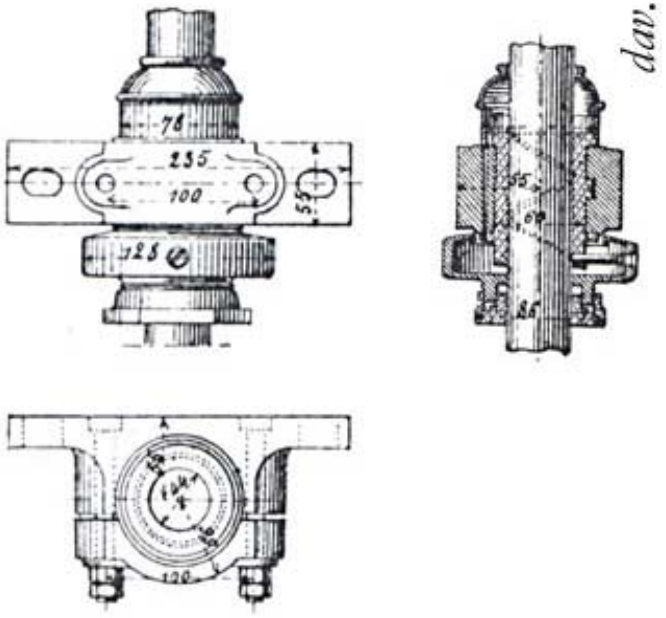


39. *Palier graisseur à disque Decoster (1920).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

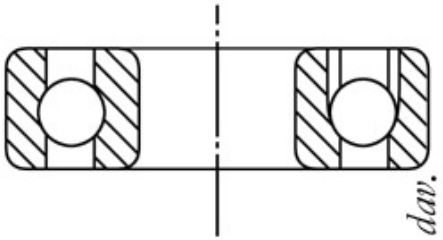


40. *Palier graisseur continu à disque et à cuiller de déversement pour arbre vertical (1920).*



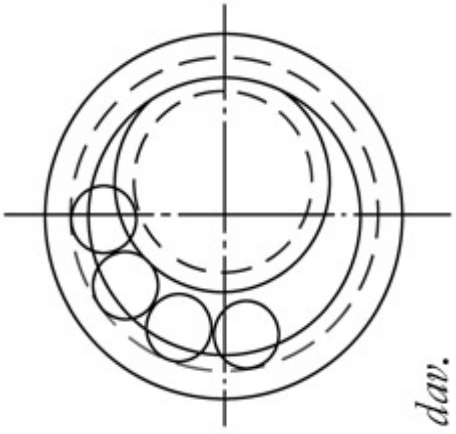
41. *Palier lubrificateur pour arbre vertical (1920).*

En 1903, la firme allemande Fichtel & Sachs fait breveter un roulement à billes, dans lequel les billes sont introduites au moyen d'une encoche de remplissage *(fig 42)*, formée par de légers évidements parallèles a l'axe pratiqués dans la face latérale du chemin de roulement, mais qui ne sont pas assez profondes pour atteindre le fond des gorges du chemin de roulement. Un brevet analogue est pris en France la même année par Malicet et Blin *(fig 99)*.



42. *Principe d'encoche de remplissage pour roulement, Fichtel & Sachs (1903).*

En 1903 aussi, Robert Conrad fait breveter un type de roulement à billes sans encoche de remplissage *(fig 43)*. Les billes sont mises en place en chauffant légèrement la bague extérieure et en décalant les deux bagues l'une par rapport à l'autre on entre les billes en forçant légèrement les deux dernières au moyen d'une petite presse. En 1906 un brevet allemand est pris pour un roulement à rouleaux, et en 1907 J. Kirney fait également breveter un roulement semblable.



43. *Montage par dilatation des éléments, Conrad (1903).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Sven Wingquist invente en 1907 le roulement à billes sphérique (il sera le fondateur de la société S.K.F.). Puis apparaissent les roulements à double rangée de billes, avec chemin extérieur sphérique, assurant l'alignement des deux chemins l'un par rapport à l'autre ; puis le roulement simple et double à rouleaux en forme de tonneau ; puis les roulements à rouleaux coniques *(fig 44)* à simple et double rangée.

44. *Roulement à rouleaux coniques, Timken (1907).*

Cette esquisse de l'Historique des roulements est évidemment incomplète comme j'ai pu le souligner en introduction. En particulier pendant ces dernières années ; le développement de la conception et de la construction des roulements s'est étroitement lié à celui de l'industrie automobile qui a en particulier assuré la création de séries normalisées.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Le cas américain

" Ce n'est pas qu'il n'existait aux Etats-Unis des roulements à billes semblables à ceux qui se fabriquent en France. Mais aux environs de 1900, la crainte de rester tributaire de l'étranger hante l'ingénieur américain et l'incite à chercher des moyens et procédés originaux lui permettant, avant tout, de créer une industrie nationale. "

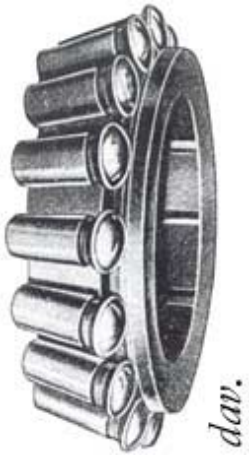
(Durbourg Jean.- La mécanique américaine imposera-t-elle les roulements à rouleaux ?. ~1920)

C'est ainsi que pour l'allumage des moteurs à explosion, on le voit s'efforcer de remplacer la magnéto (d'origine allemande), par une dynamo que le moteur actionne et qui recharge constamment des accumulateurs. Pour la même raison, l'ingénieur américain cherche à remplacer la bille, adoptée par l'Europe, par le rouleau cylindrique ou tronconique.

Le roulement suédois Timken *(fig 45)* se compose d'un cône ou bague intérieure sur lequel viennent se loger les rouleaux de forme tronconique dans un chemin de roulement dont le profil a été tracé pour les recevoir. Ces rouleaux sont contenus dans une cage d'acier embouti, d'une seule pièce. Une bague extérieure ou cuvette de forme conique également à l'intérieur, enveloppe et maintient le tout. Les formes de ces parties en contact sont telles que les génératrices des surfaces de roulement de la cuvette, des rouleaux et du cônes se coupent en un même point de l'axe central. A chaque extrémité du chemin de roulement du cône intérieur est ménagé un épaulement (ou bourrelet) qui ont pour but de maintenir les rouleaux en place. Ces roulements donnent surtout de bons résultats dans les moyeux des roues avant des automobiles et dans l'appareil de direction.

Sur le continent américain, il est un autre roulement, le *" Bock " (fig 46)*, conçu a peu près sur les mêmes données, mais ici une des extrémités des rouleaux est taillée en forme de sphère, de façon que, s'appuyant sur le bourrelet du cône intérieur, elle y roule et s'y appuie absolument comme le ferait une bille sur une butée ordinaire.

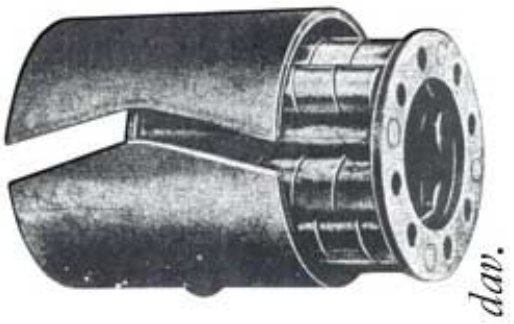
45. *Roulement à rouleaux coniques, Timken (1907).*



46. *Roulement à rouleaux système américain Bock (1905).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Citons également le roulement américain Hyatt *(fig 47)*, très employé dans les voitures américaines, surtout dans les modèles bon marché. Celui-ci, au contraire de ses concurrents ne se réclame nullement de haute précision. Les rouleaux, en ruban d'acier, ressemblent à un ressort à boudin plat. Ils possèdent donc une bonne élasticité (ou souplesse), sous les poussées radiales ou axiales et ce, dans les deux sens. Ils sont rivés deux à deux, parallèlement, sur deux colliers latéraux et maintenus en place par des axes intérieurs. Une bague extérieure fendue en V, suivant son axe, de façon à pouvoir être introduite et maintenue par pression dans le palier réservé au roulement enferme les rouleaux. Tout l'ensemble est noyé dans la graisse.



47. *Roulement à rouleaux système américain Hyatt (1905).*

Ces roulements, toujours accompagnés d'une butée, étaient employés notamment dans la construction des ponts arrière des voitures automobiles où ils supportaient les différents arbres de transmission. Ce roulement fruste et mal fini dut pour avoir été employé par centaines de mille, avoir donné d'excellents résultats. Son prix peu élevé fut certainement une des principales causes de son incroyable succès. Par ailleurs le constructeur américain ne s'effrayaient pas de solutions que les européens redoutaient. C'est ainsi que sur les automobiles à bon marché produites à plus d'un million d'unités par an, les moyeux des roues étaient montés comme de vulgaires moyeux de bicyclettes : des billes libres entre un cône et une cuvette dont le serrage se réglait au moyen d'un écrou *(fig 38)*.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les chemins de fer : un cas particulier

" Albert Einstein, à qui on demandait un jour quelle était la différence entre lui et un citoyen ordinaire, répondit que, si on demandait à un citoyen ordinaire de chercher, par exemple, une aiguille dans une meule de foin, il s'arrêterait une fois trouvée l'aiguille. Lui, par contre, continuerait à chercher dans le tas de foin, pour essayer d'y trouver d'autres aiguilles. Il y a très souvent des Einstein dans les entreprises, qui essaient de repousser les frontières de la science et de la technique. Les entreprises qui réussissent constatent que les nouvelles inventions sont des produits qui, souvent, n'ont pas de succès sur le marché pour lequel ils étaient destinés mais ont une souplesse suffisante pour que l'on puisse y apporter des ajustements. "

(lu sur internet)

Le roulement à billes devient l'élément fondamental pour deux formes de déplacement, le vélo puis l'automobile. Cependant n'oublions pas le cas du chemin de fer, certes moins conséquent pour le développement du roulements à billes.

A l'époque de la révolution industrielle, les techniques du roulement se précisent, mais partout où une rotation est présente, on privilégie encore le palier comme intermédiaire entre l'arbre et l'alésage. Le roulement tarde à faire son apparition dans l'industrie ferroviaire et mis à part quelques problèmes d'ordre technologique quelques raisons sociales en sont aussi à l'origine.

Preuve en est, l'histoire de John Wesley Hyatt *(fig 47)*. Il s'est rendu compte que les roulements à billes étaient exactement ce qu'il fallait pour les essieux des wagons de marchandises. Les dirigeants et employés des chemins de fer américains avaient l'habitude d'insérer dans les roues de leurs wagons des chiffons imbibés d'huile pour résoudre le problème de la friction. Ils aimaient bien leurs vieux chiffons et M. Hyatt fit faillite en essayant de les convaincre d'utiliser ses roulements cylindriques.

Alfred Sloane (qui créera plus tard General Motors) à peine sorti major du M.I.T., à la fin des années 1890, rachète l'entreprise de J.W. Hyatt avec l'aide de son père. Contrairement à ce dernier, Sloane était prêt à élargir sa vision du produit. Le roulement à billes était parfait pour la voiture qui venait d'être lancée sur le marché. En deux ans, Sloane créa une entreprise florissante et, pendant vingt ans, Henry Ford fut son meilleur client. Ford deviendra le créateur de l'entreprise du même nom…

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

La bicyclette : première bénéficiaire

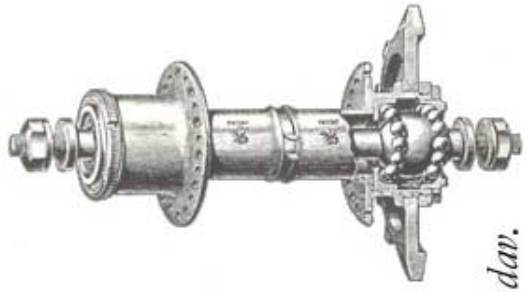
" Le vélo augmente, à l'époque de sa création et aujourd'hui encore, la mobilité de l'homme jusqu'à un nouveau degré. "

(lu sur internet)

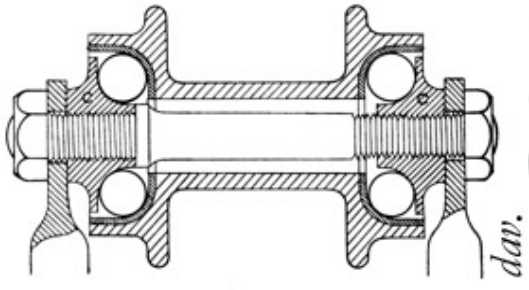
48. *Vélo de type Rover (1888)*

Le roulement à billes a rendu possible l'invention de la bicyclette *(fig 48)*, c'est-à-dire l'utilisation la plus directe de la roue, cette invention des premières civilisations, pour le déplacement rapide de l'homme par sa seule force musculaire. Le roulement à billes est ici le symbole d'une rupture définitive avec la tradition et des directions opposées que peut prendre le développement.

En 1869, le Français Jules Pierre Suviray dépose les dessins et la description d'un dispositif d'application du roulement à billes aux axes des roues d'un véhicule. Cette innovation *(fig 49*, *fig 50)* appliquée à la bicyclette est l'une des plus importantes de l'histoire du roulement. Viendront ensuite tous les perfectionnements aux moyeux des vélos, notons celui de Rodge en 1878, qui est l'origine du roulement dit à cône et cuvette *(fig 38)*.

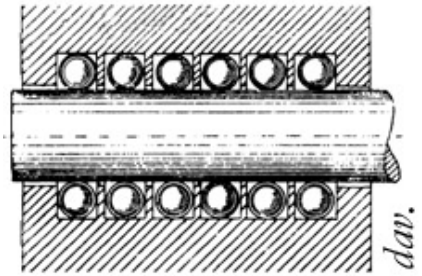


49. *Moyeu à billes appliqué au vélo (1869).*

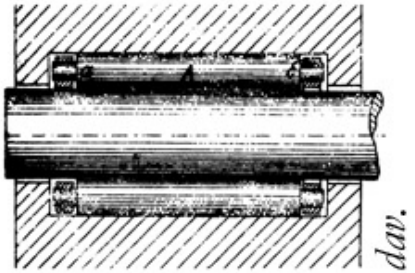


50. *Moyeu à billes appliqué au vélo (1869).*

A bicyclette, l'homme va de trois à quatre fois plus vite qu'à pied, tout en dépensant cinq fois moins d'énergie. En terrain plat, il lui suffit de dépenser 0,15 calorie pour transporter un gramme de son corps sur un kilomètre. La bicyclette est un outil parfait qui permet à l'homme d'utiliser au mieux son énergie métabolique pour se mouvoir: ainsi outillé, l'homme dépasse le rendement de toutes les machines et celui de tous les animaux. Le roulement appliqué aux éléments tournants ; moyeu *(fig 49, fig 50)* et pédalier *(fig 51*, *fig 52)* permet d'augmenter ce rendement et diminue naturellement l'énergie à fournir, le coefficient de frottement divisé par mille.



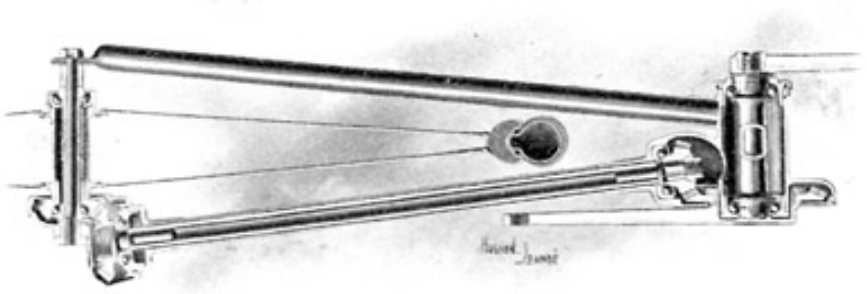
51. *Pédalier de vélo, roulement à billes (1870).*



52. *Pédalier de vélo, roulement à rouleaux cylindriques (1870).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

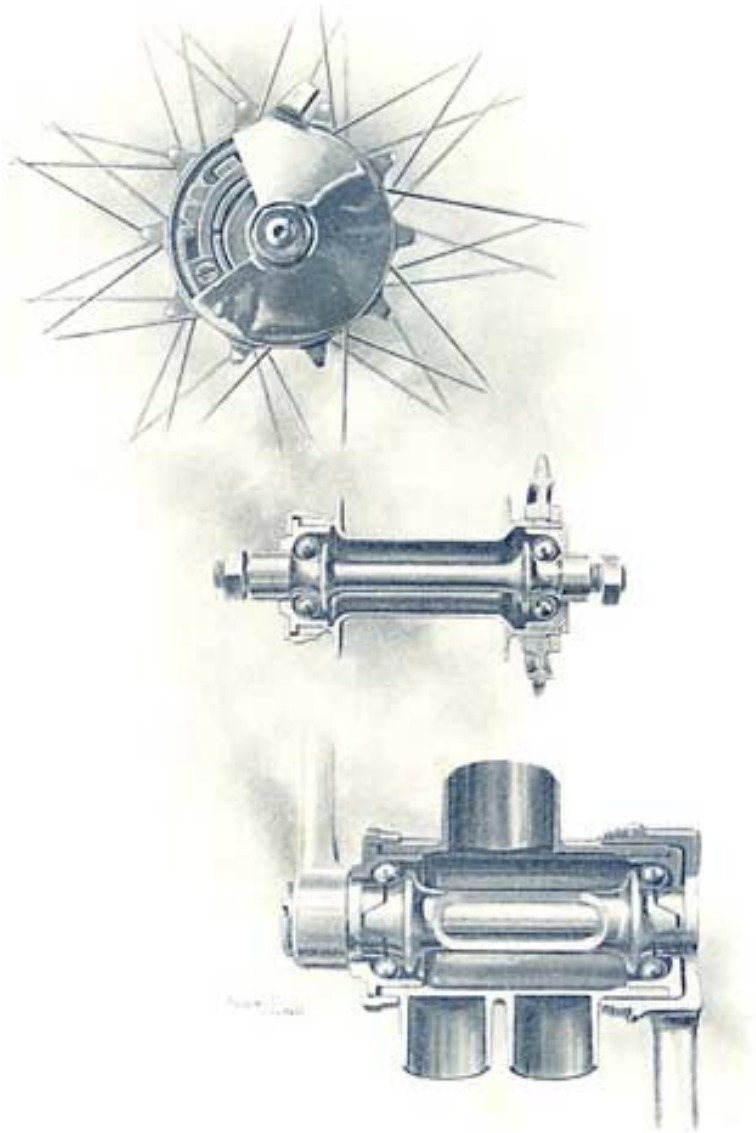
En 1899, le constructeur Peugeot dépose un système breveté de bicyclettes sans chaîne. Cette construction originale *(fig 53)* lui confère un poids plus léger qu'avec la classique chaîne. Ensemble astucieux de roulements et de pignons d'angles logés dans le cadre du vélo. L'ensemble monté et indéformable et les pignons d'angles étant montés sur une base solide, les efforts produits sur les manivelles sont intégralement transmis à la roue motrice, d'où un excellent rendement. Toutefois, on peut voir que ce système ne possède pas de dispositif permettant de rendre indépendant le pédalier de la roue motrice. En fonctionnement, le pédalier tourne proportionnellement à la roue, on peut supposer que la solution à ce léger désagrément aurait engendré une solution trop volumineuse. De plus, on peut supposer que la fabrication d'un tel système était onéreuse, sans compter le réglage de la coïncidence des sommets des cônes des engrenages qui nécessite un réglage précis et qui à pu conduire à la disparition partielle de ce système, car aujourd'hui seules 20 à 30 unités sont produites par an.



53. *Système breveté de bicyclette sans-chaîne, Peugeot (1899).*

La conjonction de l'invention du roulement à billes et de celles de la roue à rayons et du pneu ont pour l'histoire du transport une importance essentielle.

54. *Sigle des établissements Peugeot, Valentigney (1899).*



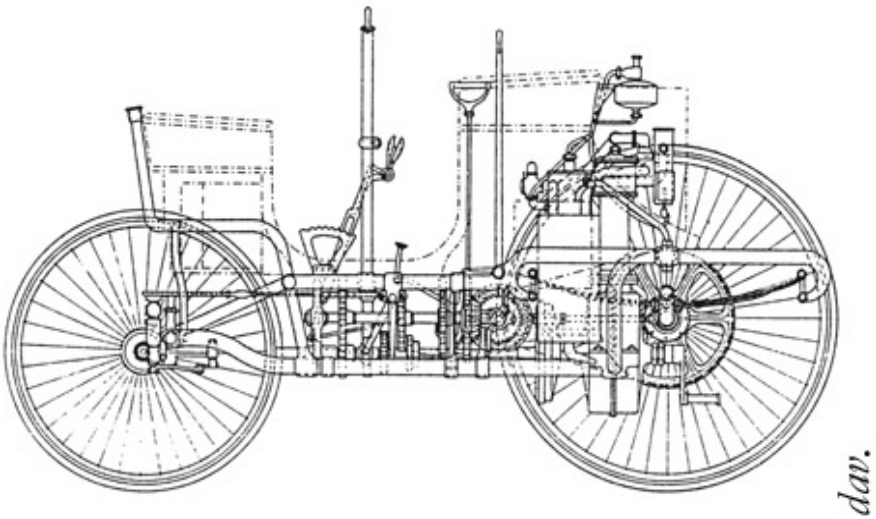
55. *Les roulements appliqués aux vélocipèdes, Peugeot (1899).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

La voiture : étude du quadricycle Peugeot type A

" La plus importante manufacture française de vélocipèdes, la maison Les Fils de PEUGEOT frères ... De cette maison sortaient déjà les vélocipèdes Serpolet, qu'on a pu voir à l'Exposition universelle, mais les résultats obtenus avec ce système de moteur ont pour ainsi dire été nuls. "

(courrier d'un lecteur au journal " le cycliste ". juillet 1890)



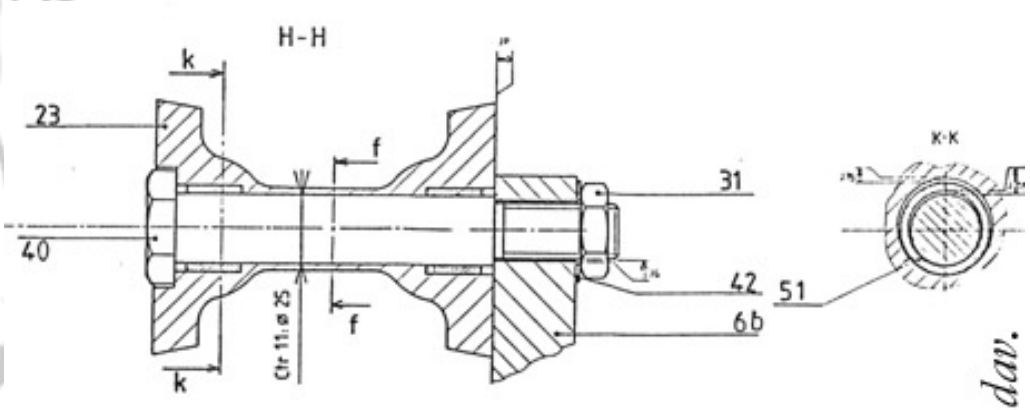
56. *Quadricycle Peugeot type A (1906).*

De la même façon que pour les chemins de fer, le quadricycle Peugeot type A *(fig 56)*, dont la production en série commence à partir de 1906, permet de montrer l'adaptation difficile des roulements dans le domaine automobile. En effet, les roulement n'en sont à cette époque qu'à leurs prémices, et les intermédiaires arbre/alésage sont effectués par des paliers. Les essieux étant par définition les éléments tournants principaux dans une voiture (car reliés directement aux roues), ce devraient être les premiers à intégrer la technologie du roulement.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Pourtant, les essieux de ce véhicule restaient guidés en rotation par des paliers comme on peut le voir *(fig 57)*, c'est le palier en bronze référencé *pièce**{51}** (fig 58)* qui assure cette fonction.

57. *Détail du moyeu avant, quadricycle Peugeot type A (1906).*



58. *Schématisation de l'essieu avant, quadricycle Peugeot type A (1906).*

Désignation :
*pièce**{23}** :* moyeu avant, obtention : moulage sable, fraisage, lamage, alésage. XC38
*pièce**{51}** :* bague de guidage en rotation, obtention : perçage, alésage, tournage. Bronze D=30, d=25

"Pourquoi l'intégration des roulements s'est alors faite beaucoup plus tôt sur les vélos que sur les autos ?"

A l'époque, les automobiles sont peu développées et l'un des moyens de déplacement privilégié reste la bicyclette. On peut penser que pour des raisons économiques et techniques, le palier est encore privilégié dans l'automobile, de même que dans l'industrie. Le palier est en effet moins lourd et moins cher qu'un roulement. D'autant plus que les faibles charges que supportent les essieux ainsi que les petites vitesses des véhicules de l'époque, n'incitent pas au changement.

Le roulement trouve toute sa fonction dès lors qu'il s'agit de réduire les efforts humains à fournir pour se mouvoir. A cette époque, Cette notion de rendement et d'économie d'énergie n'est pas encore présente à l'esprit de concepteurs, surtout si cette énergie à fournir n'est pas d'origine humaine, comme les automobiles ou les grandes machines " énergivores ".

Toutefois, les ingénieurs se rendent très vite compte de l'utilité des roulements, surtout pour l'industrie automobile : les vitesses augmentant progressivement, les rendements impressionnants de ceux-ci et surtout le développement de l'industrie des roulements rendent possible le remplacement des paliers.

Aux environs de 1910, les roulements commencent à être adaptés à l'arbre manivelle des automobiles. En raison de la vitesse - importante - à laquelle tournait les moteurs, les portées de roulement (surface d'appui entre l'arbre et la bague intérieure) ne devaient jamais être inférieures à deux fois le diamètre de l'arbre qui roule sur le coussinet. Il n'était d'ailleurs pas exagéré de prévoir trois fois le diamètre dans un moteur étudié en vue d'un usage durable. En effet, à l'époque, l'arbre manivelle et les coussinets étaient les parties du moteur qui supportaient les plus grands efforts, les plus sujets à une usure rapide. L'acheteur soucieux d'avoir un moteur susceptible de lui fournir un long service, se résignait alors à acheter un moteur un peu plus lourd, mais ayant un arbre manivelle puissant, monté sur des roulements très lourds. Rien ne vaut alors le large et long coussinet en bronze dur, largement lubrifié ; le graissage des portées de roulements de l'arbre manivelle dans ses coussinets étant assuré par les projections d'huile du carter, faites par le barbotage de la manivelle et de la bielle.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

brevets & Innovations

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Siècle propice aux innovations

"A partir de 1902-1903, les innovations relatives aux roulements se précisent. Tout reste à inventer dans ce nouveau domaine. Les besoins grandissent ; l'automobile et la bicyclette nécessitent de plus en plus de roulements - autant en quantité qu'en qualité -, de nombreuses innovations naissent alors."

(Encyclopédie des sciences industrielles Quillet.- Mécanique généralités et applications. 1930)

Ces innovations sont visibles dans les dépôts de brevets qui permettent de se confronter aux idées d'antan. Toujours valables, ces idées traduisent la créativité d'une époque et il m'a paru intéressant de travailler sur les brevets relatifs aux roulements. Les archives départementales de la ville de Belfort disposent de tous les brevets qui couvrent la période de 1902 à aujourd'hui. Ma motivation initiale de vouloir défricher tous les brevets s'est vite atténuée devant l'immensité du travail et la croissance du nombre des brevets au cours du temps.

Mon choix s'est alors porté sur une analyse statistique en commençant par un recensement de tous les brevets de 1902 à 1904 (naissance du roulement " industriel ") puis sondages décennaux parmi la masse des brevets déposés (1910, 1920, 1930, ...) afin de laisser apparaître une cinquantaine de brevets.

La présentation des brevets qui va suivre est - arbitrairement - découpée en six regroupements principaux. Ces regroupements m'ont été suggérés au vue des innovations qui sont relatives:

aux éléments tournants, à la cage et aux éléments de séparation, au montage du roulement, au contact mécanique, à la lubrification et enfin aux précurseurs.

La catégorie " précurseurs " présentent des roulements hybrident pour l'époque qui sont devenus des roulements standards.

Enfin mon analyse, personnelle, est basée sur mes connaissances techniques. J'ai essayé de décrire l'idée originale qui me l'a fait placer dans l'une des six classes. J'ai traduit aussi bien que je pouvais les dessins techniques en bornant mon analyse à la comparaison avec d'autres roulements, aux avantages, aux inconvénients, à certains phénomènes mécaniques et conditions techniques.

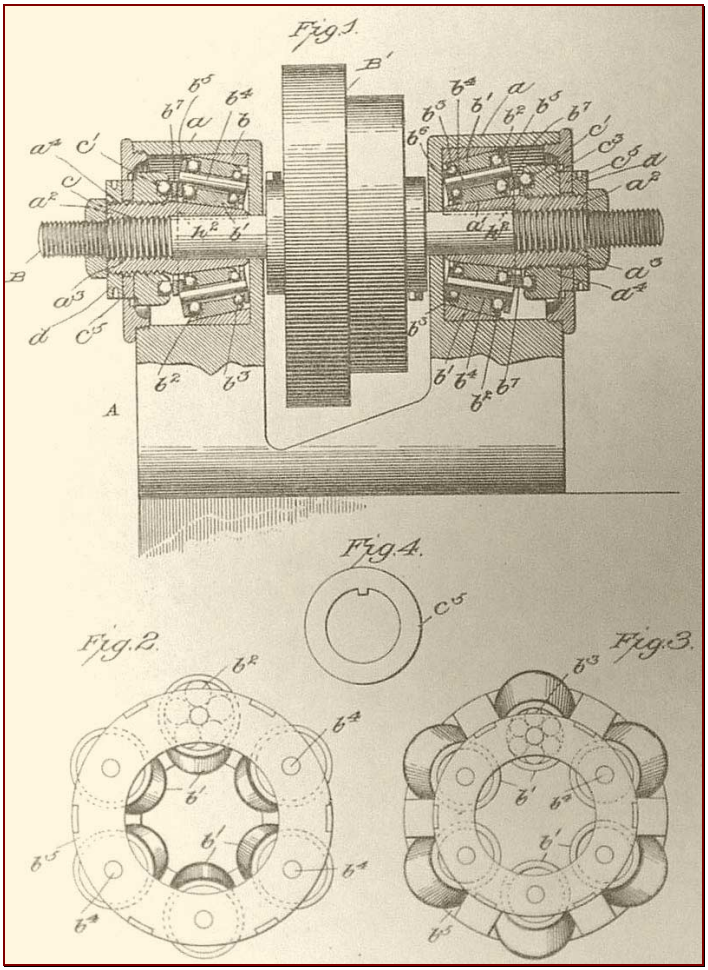
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Dépôts de brevets d'innovation relatifs aux éléments tournants

Les premiers roulements ne possèdent pas tous les éléments traditionnels comme la cage ou les bagues et mis à part les billes qui sont les éléments tournants les plus élémentaires, on assiste à l'émergence d'éléments tournants moins " conventionnels ".

Le brevet *(fig 59)* montre un ancêtre des roulements à rouleaux coniques. Pour supprimer les contacts des éléments tournants, l'idée consiste à remplacer les billes par des cônes dont on peut immobiliser l'axe dans une cage, se sont des billes qui assurent la rotation du cône par rapport à son axe.

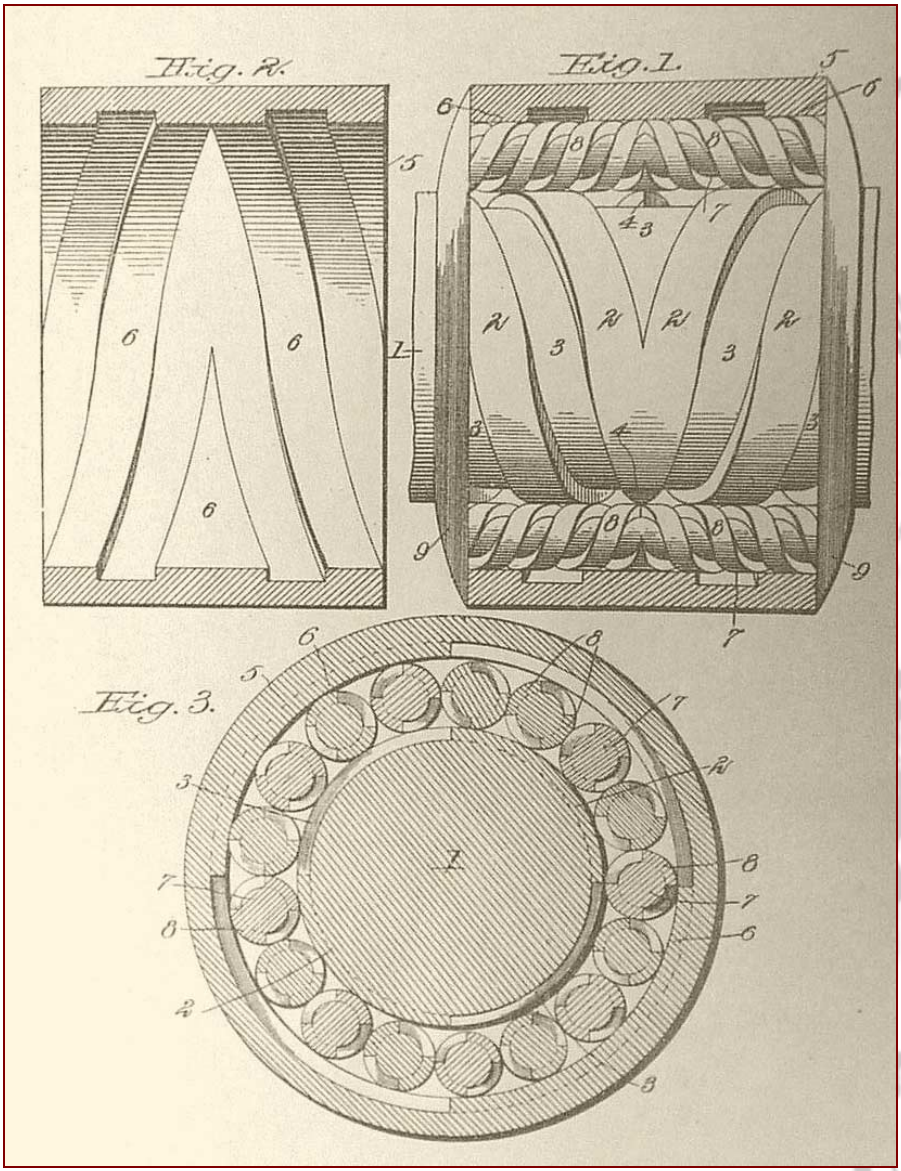
En fait, ce système qui sépare les éléments coniques a l'inconvénient de revenir quand même au problème du contact entre éléments tournants, c'est à dire les billes.



59. *Palier anti-friction à rouleaux, Sté Moffett Bearing Company (1902).*

Le brevet *(fig 60)* présente un système comme on ne rencontre peu, les éléments tournants sont " filetés " dans le but d'obtenir, comme pour les billes, des surfaces de contact moins importantes.

De même l'arbre et l'alésage possèdent le même état de surface. Evidemment les éléments tournants, non protégés les uns des autres, s'auto-usinent.

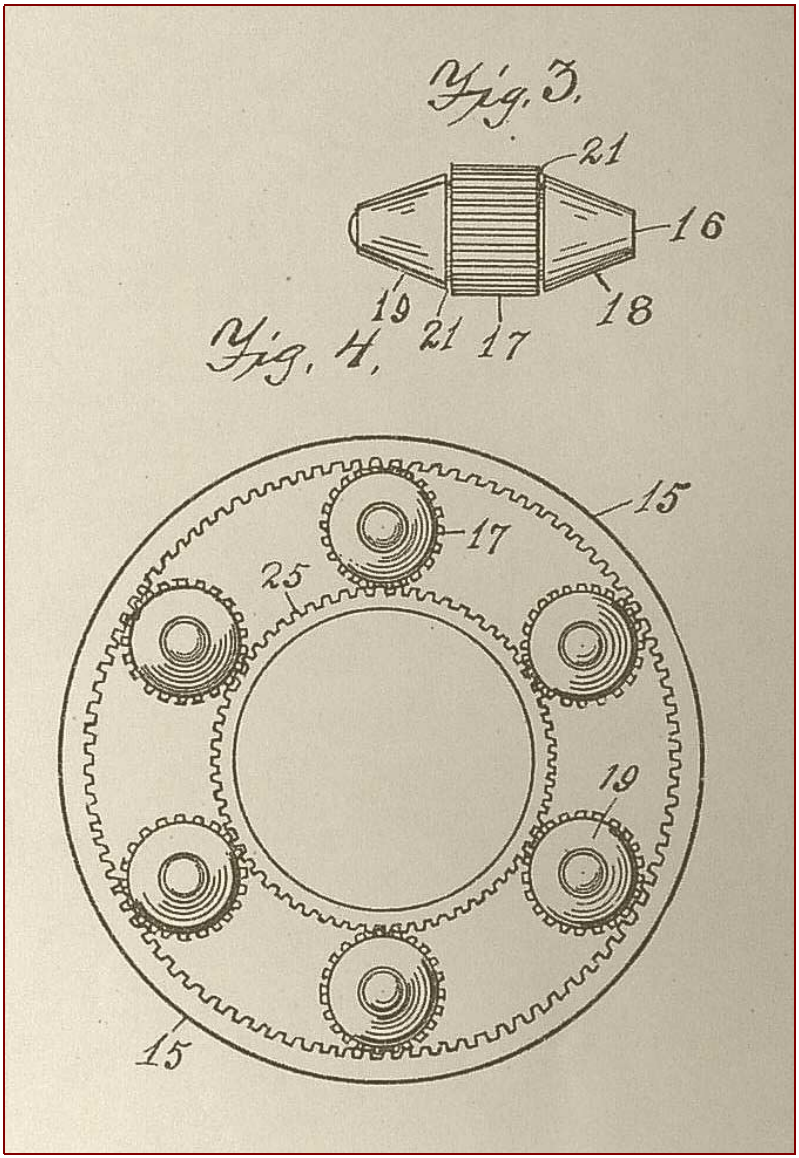


60. *Coussinet anti-friction, Chester A. Latham (1902).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Le roulement du brevet *(fig 61)* est un roulement dont les éléments tournants sont dentés. On devine aisément le bruit engendré par un tel système.

Cependant la séparation des éléments tournants est réalisée directement par les dents, ce système est en fait un précurseur des trains épicycloïdaux.

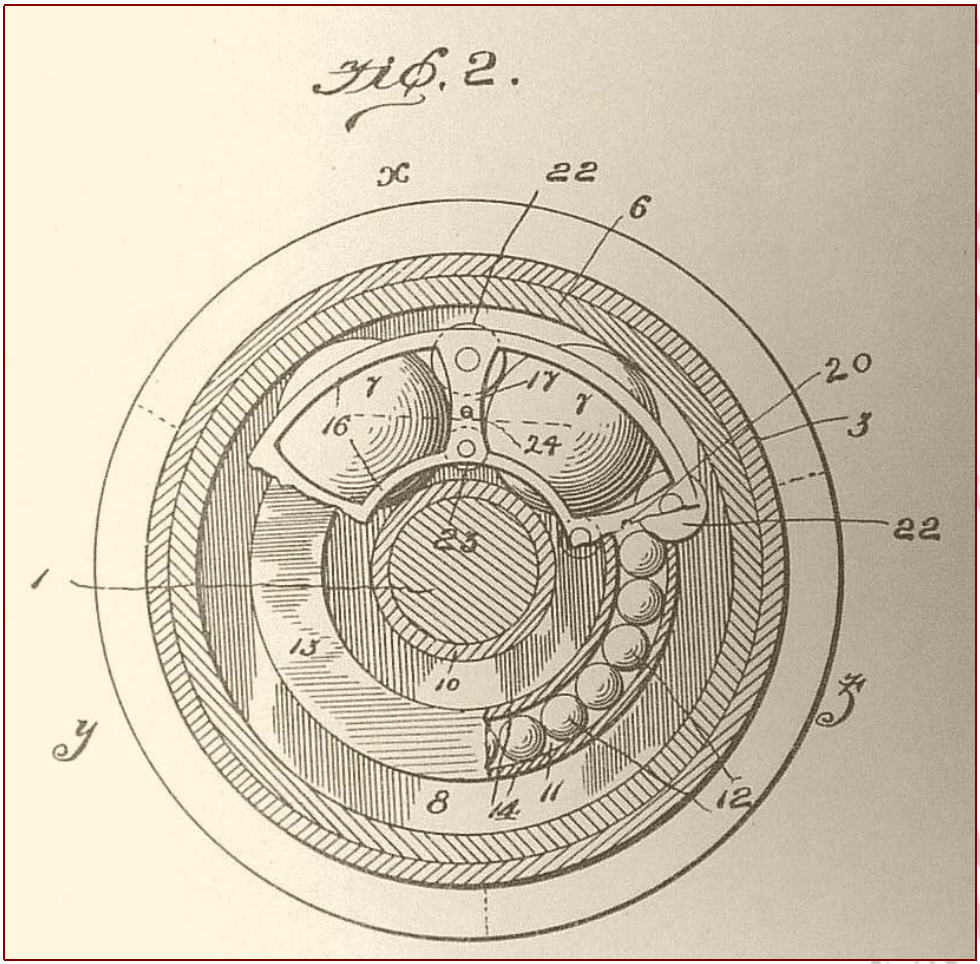


61. *Coussinet à rouleaux, Amos Clinton Stilson (1902).*

Les roulements doivent supporter des charges axiales ou radiales, voire les deux. Ainsi, on se rend compte que les roulements ne peuvent pas être identiques et assurer la même fonction.

C'est cette aptitude à supporter des charges, qui va entraîner les différences fondamentales et créer les standards industriels.

Le roulement du brevet *(fig 62)* présente deux billes plus importantes que les autres, cette différence permet d'encaisser des charges radiales importantes dans la mesure où le roulement est bien présenté par rapport à la direction de la charge.

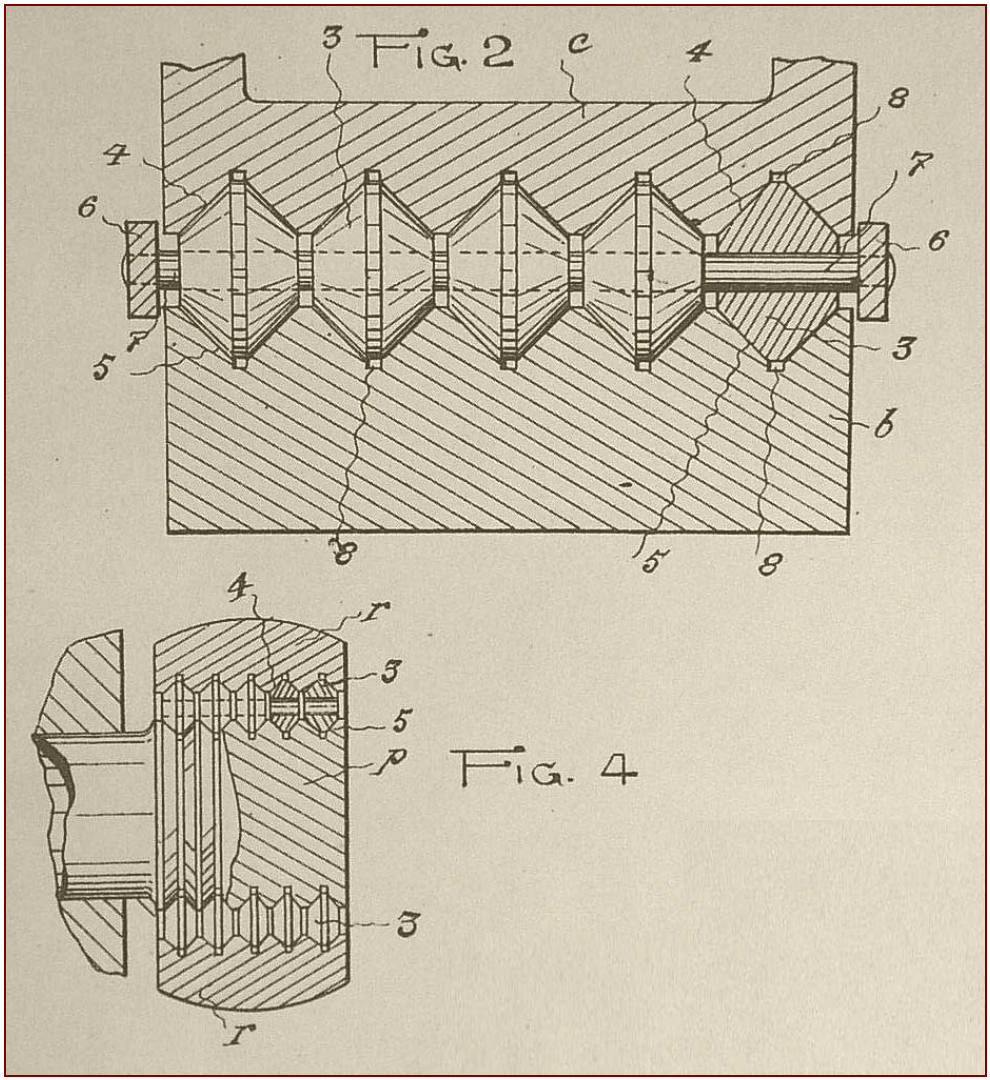


62. *Coussinet à billes, Albert Ennis Henderson (1902).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

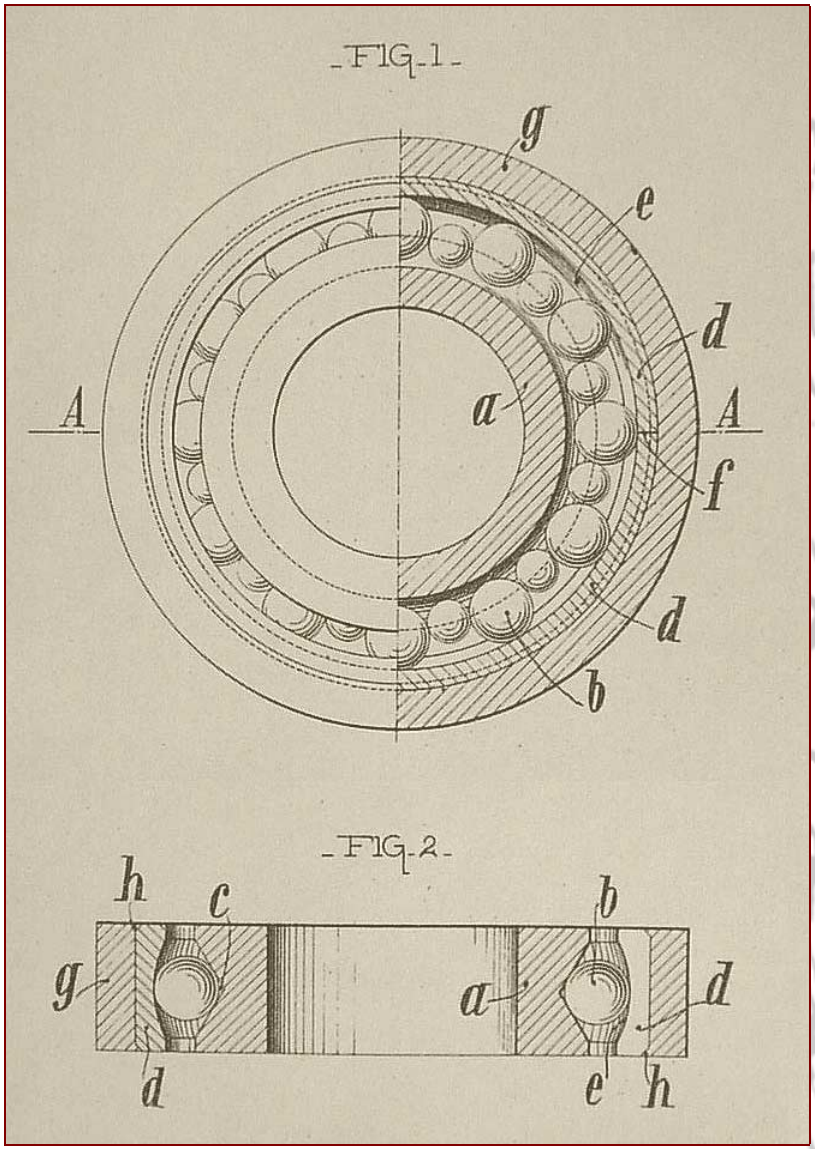
Le brevet *(fig 63)* est tout aussi original puisqu'il présente des éléments tournants de forme particulière, l'idée ne présente pas beaucoup d'avantage puisqu'il faut usiner l'arbre pour l'adaptation.

De plus pour que ces éléments assurent leur fonction, il faut que le nombre de points de contact soit le plus limité possible sinon la bille où l'élément tournant est imprégné d'un moment qui gène la rotation et détériore le roulement.



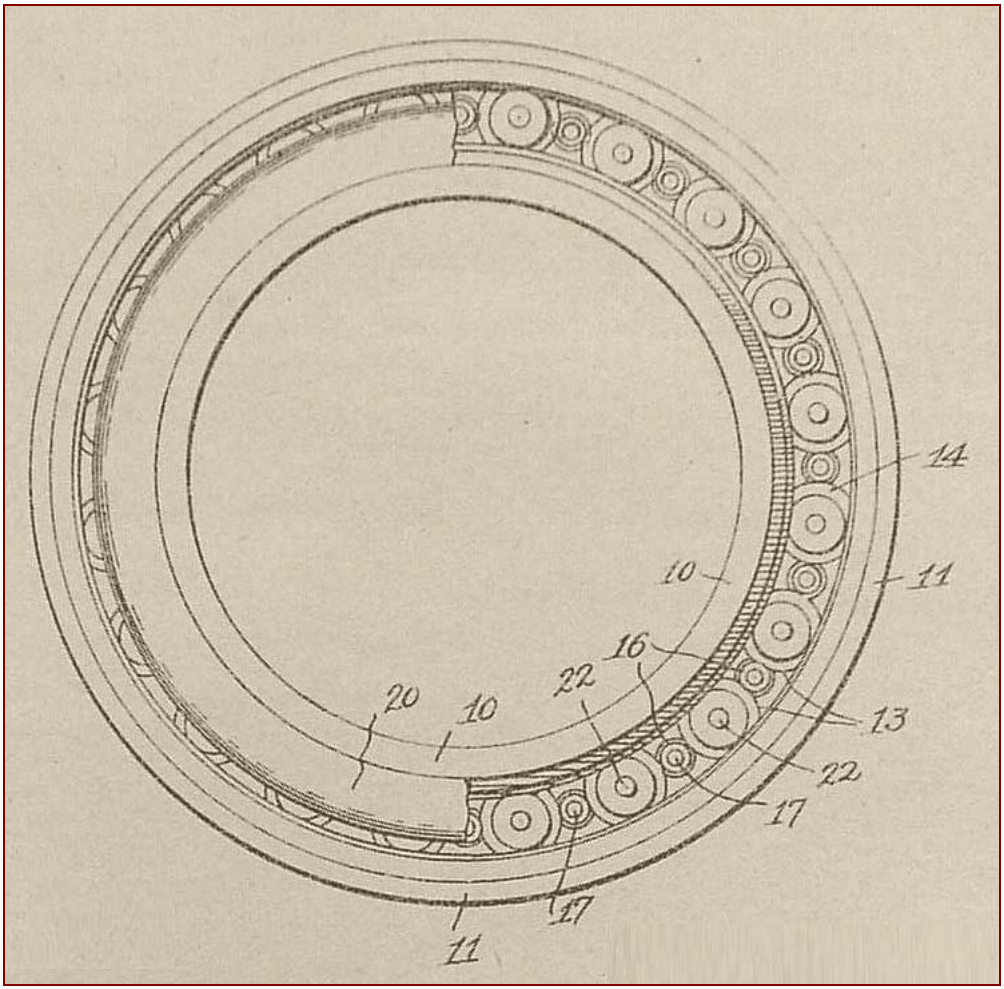
63. *Coussinets à rouleaux, John Kincaid (1903).*

Les roulements des brevets *(fig 64, fig 65, fig 66)* sont relatifs à des époques différentes mais basés sur le même principe ; celui de l'alternance des diamètres des éléments tournants.



64. *Roulements à billes, Frantz Paquin (1904).*

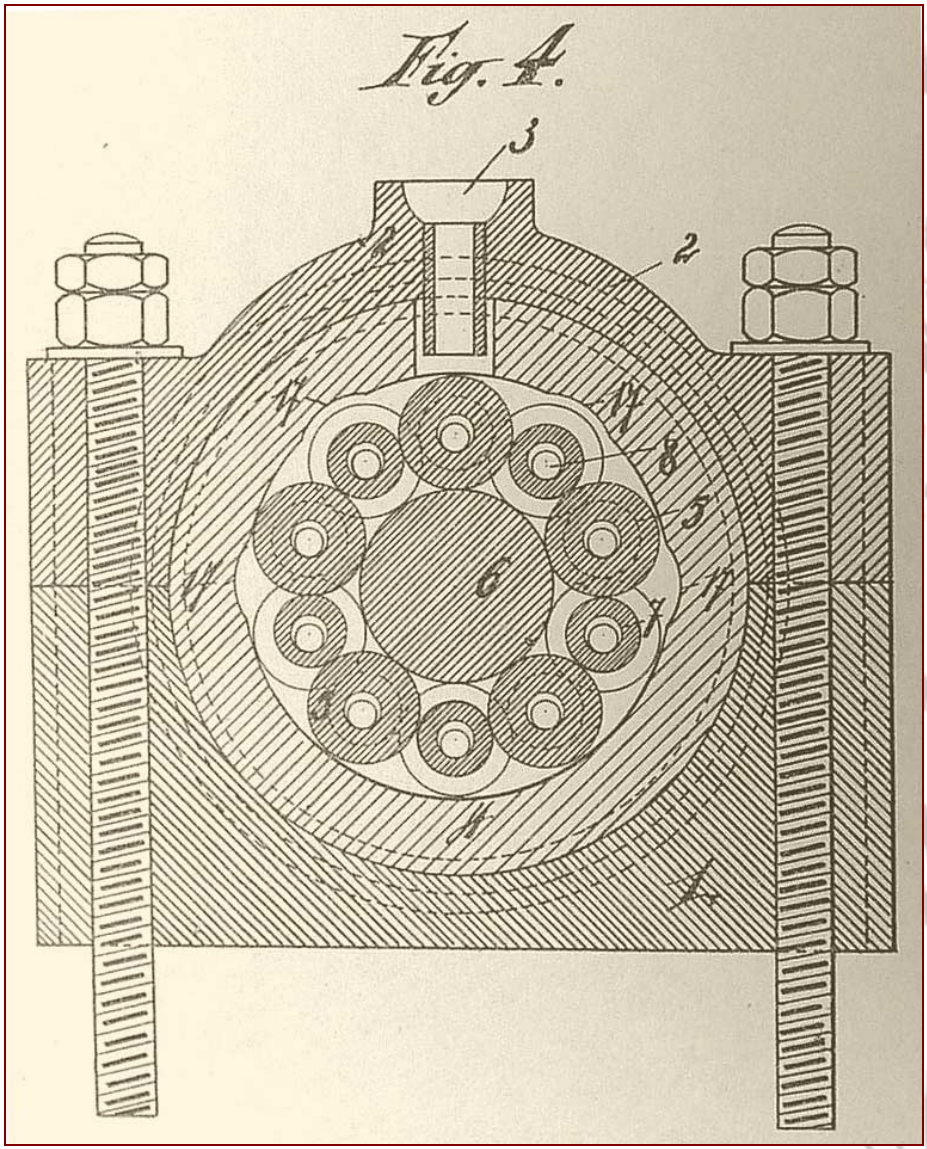
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9



65. *Palier à rouleaux, Sté Killian Bearing Company (1930).*

Le contact est assuré par les éléments de plus gros diamètres, quant' aux petits diamètres ils assurent la fonction d'ajustement en réduisant le jeu entre les éléments de plus gros diamètre.

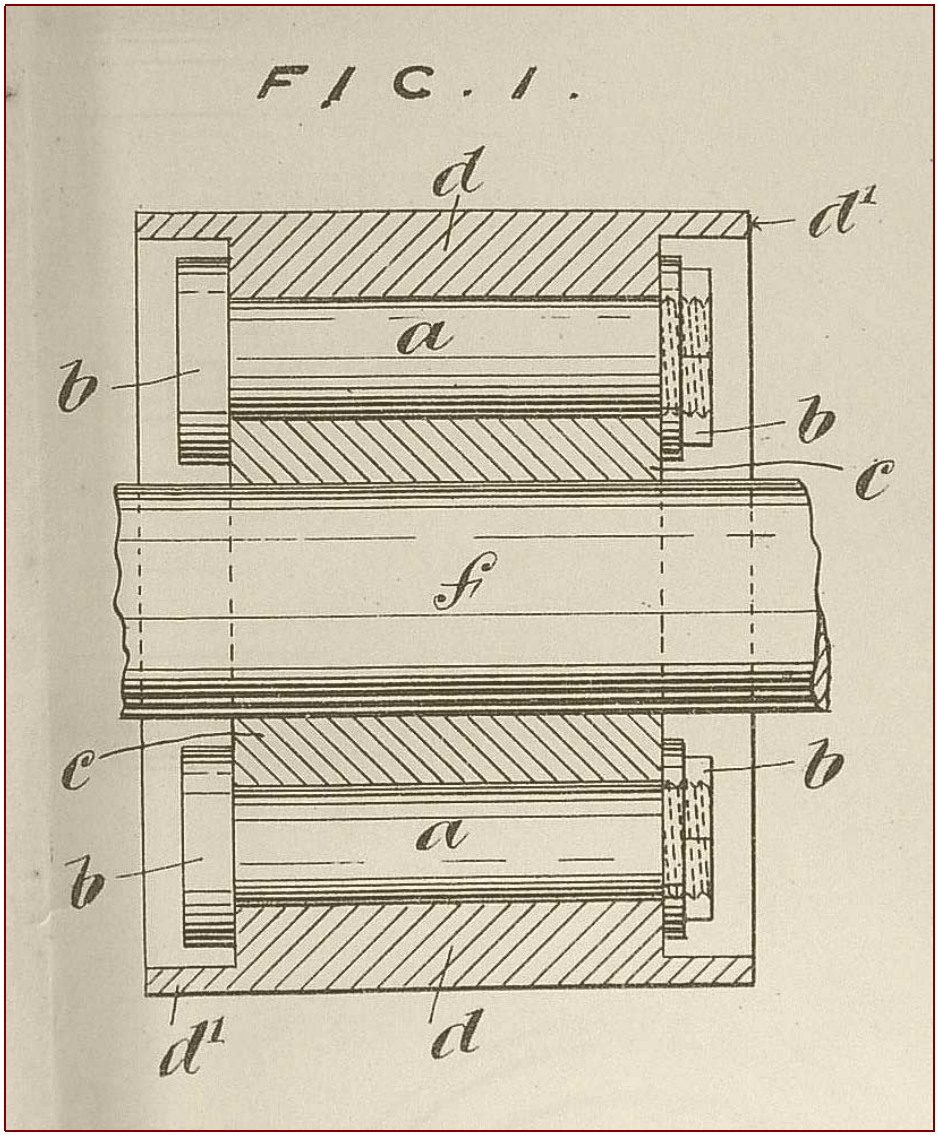
Le brevet *(fig 66)* montre bien le jeu qu'il existe entre les éléments de petit diamètre et leurs axes, ce jeu permet d'auto-centrer les éléments dans le roulement.



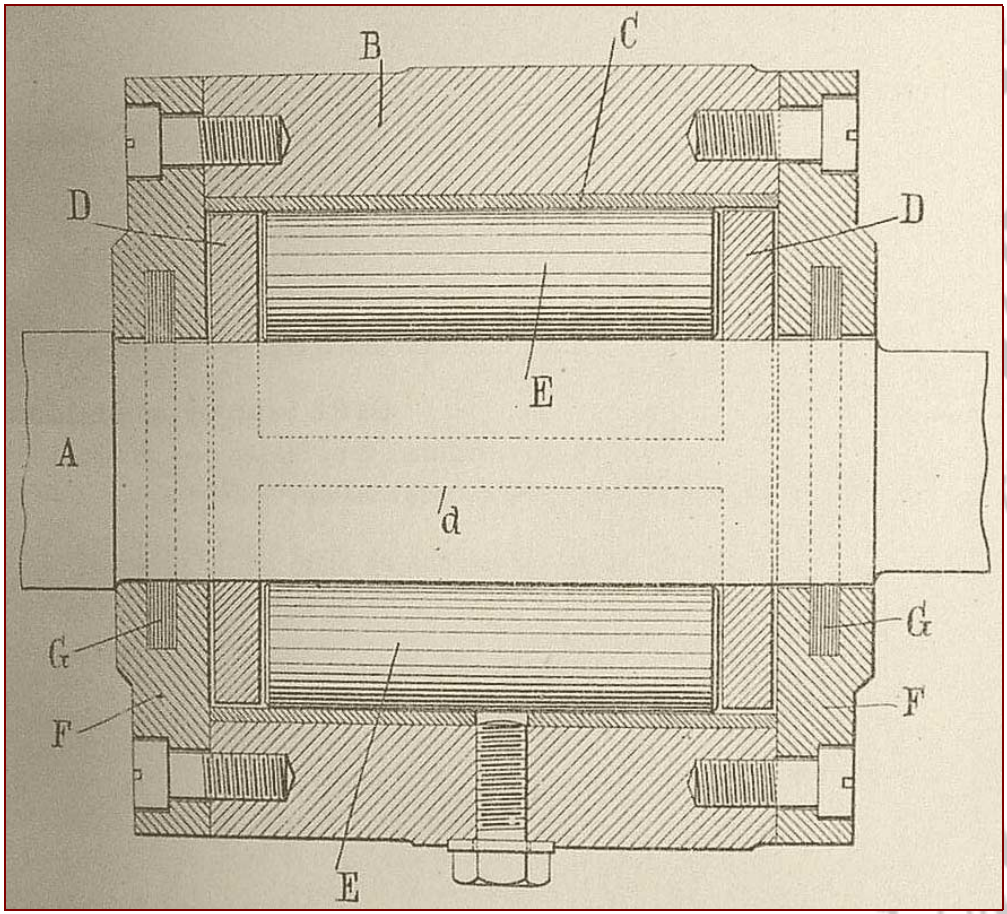
66. *Perfectionnement aux coussinets à rouleaux, Léon Le Brun (1902).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les roulements des brevets *(fig 67, fig 68, fig 69)* sont les précurseurs des roulements à rouleaux cylindriques



67. *Coussinets à rouleaux, William Houldsworth (1903).*

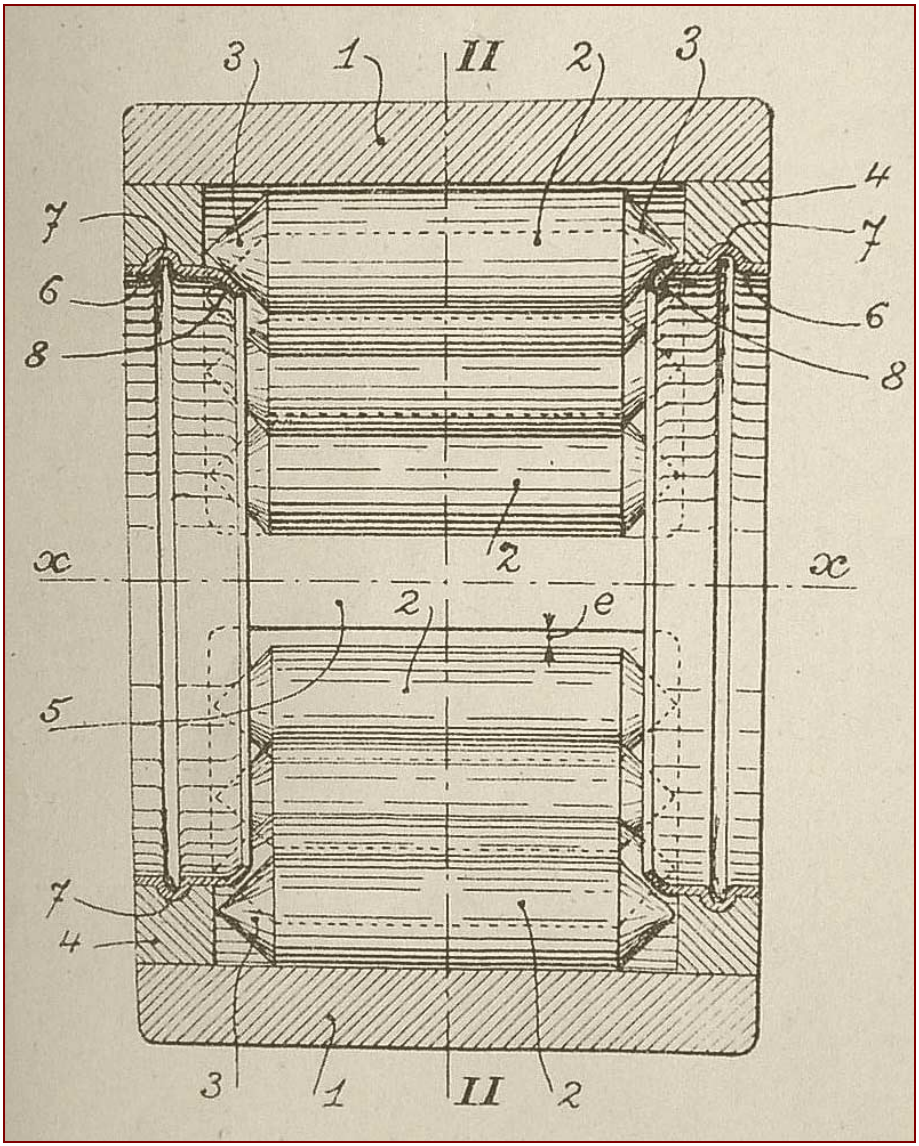


68. *Roulement à rouleaux, Sté les fils de A. Derome (1910).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Cependant les rouleaux sont beaucoup plus massifs que ceux que l'on connaît.

La forme conique des éléments du brevet *(fig 69)* permet de maintenir ceux-ci distants les uns des autres, ce qui n'était pas le cas 40 ans auparavant.



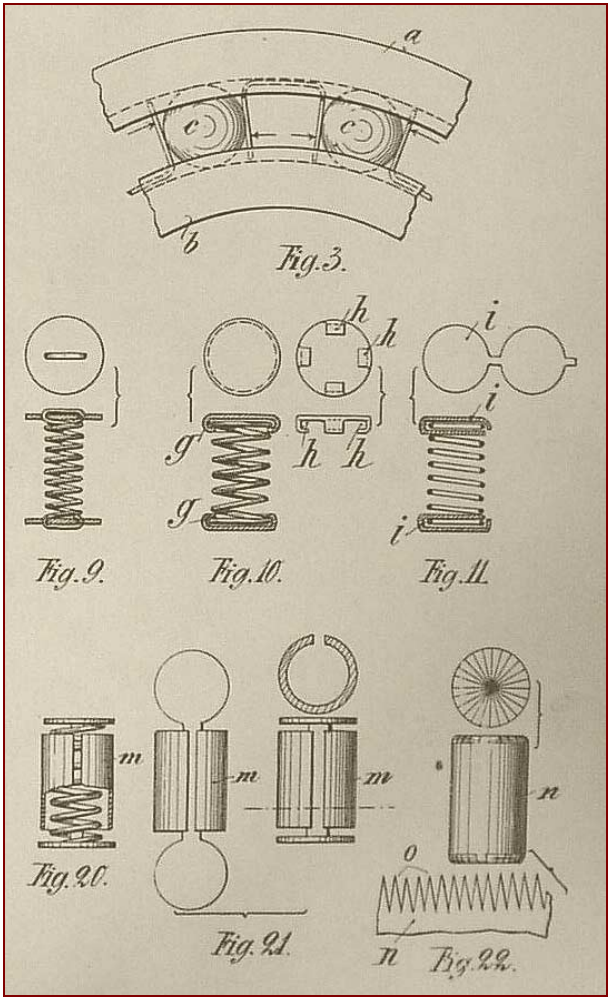
69. *Roulement à éléments cylindriques de roulements, Sté des Roulements à Aiguilles (1950).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Dépôts de brevets d'innovation relatifs aux cage et aux éléments de séparation

Cage et éléments de séparation La cage est indispensable au roulement pour éviter l'usure des éléments tournants les uns par rapport aux autres.

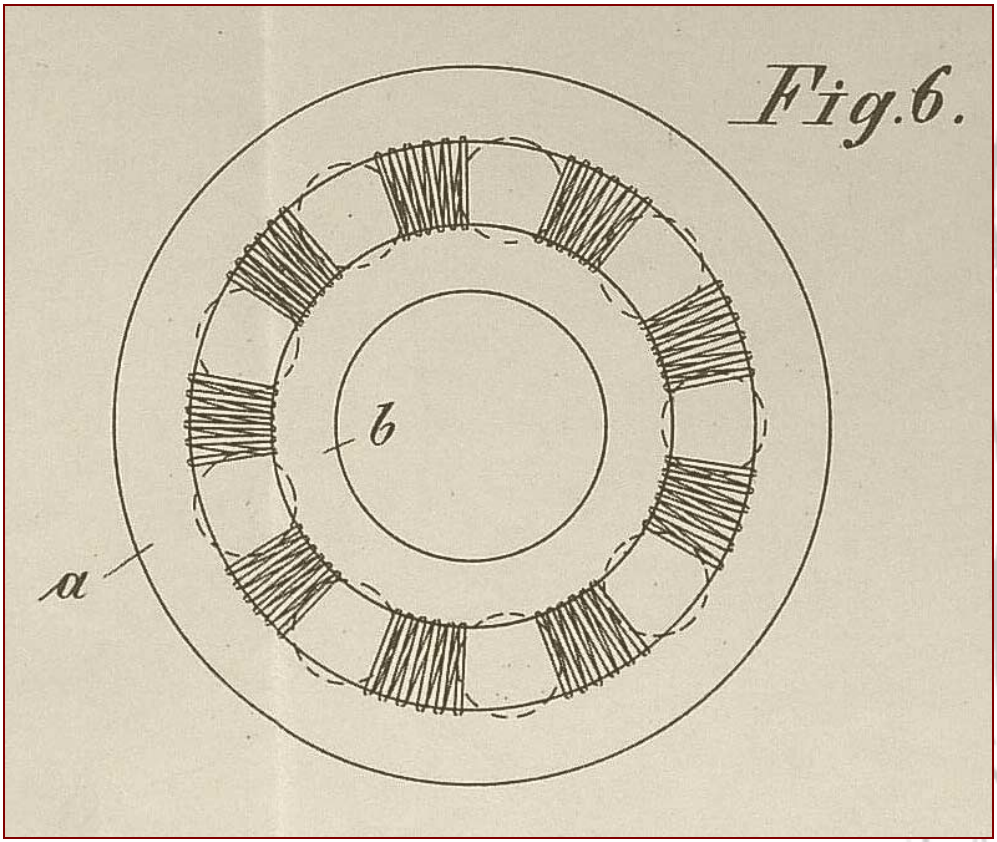
Au début, la cage se résume à des éléments de séparation comme on peut le voir sur le brevet *(fig 70)*.



70. *Perfectionnement aux roulements et coussinets, Robert Conrad (1903).*

Un des gros inconvénients des éléments séparés vis à vis de la cage est (entre autres) la pénibilité de montage puisque ce sont autant d'éléments séparateurs que d'éléments tournants qu'il faut enfiler dans le roulement.

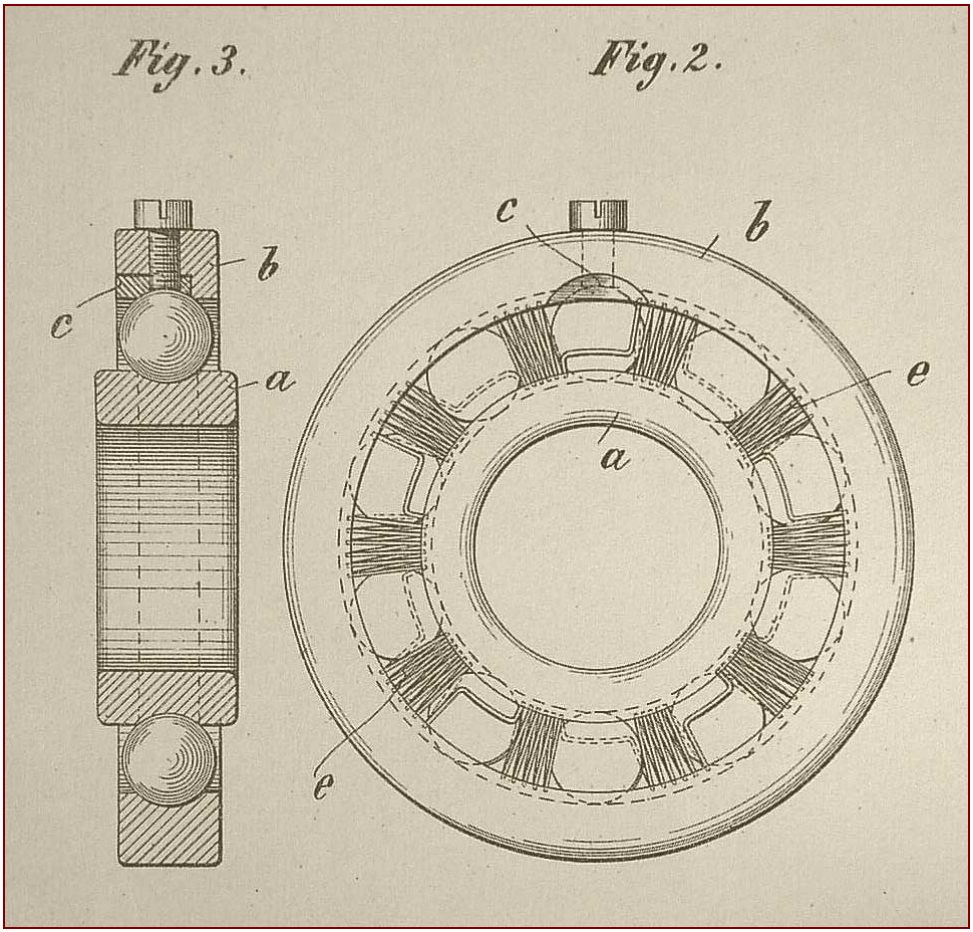
Cependant, on comprend bien la nécessité des éléments de séparation au " pseudo " goupilles élastique du brevet *(fig 70)*.



71. *Perfectionnement aux coussinets à billes, Robert Conrad (1903).*

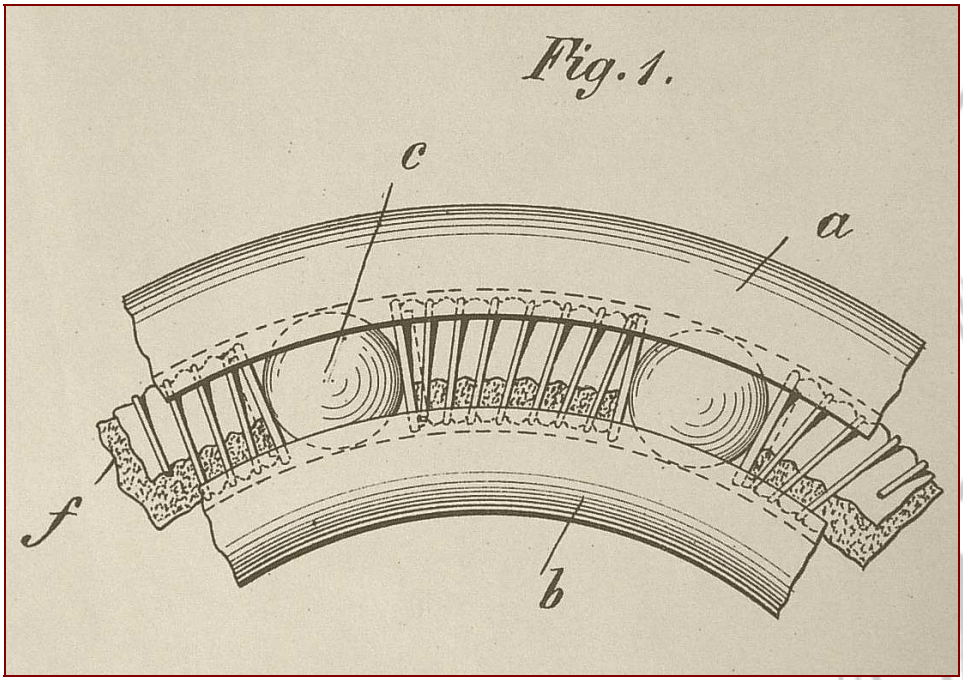
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

On voit apparaître des ressorts de séparation sur les brevets *(fig 71, fig 72)* qui en plus d'empêcher l'usure, réduisent les chocs entre les billes et ipso facto diminuent le bruit engendré.



72. *Perfectionnement aux roulements et coussinets, Robert Conrad (1903).*

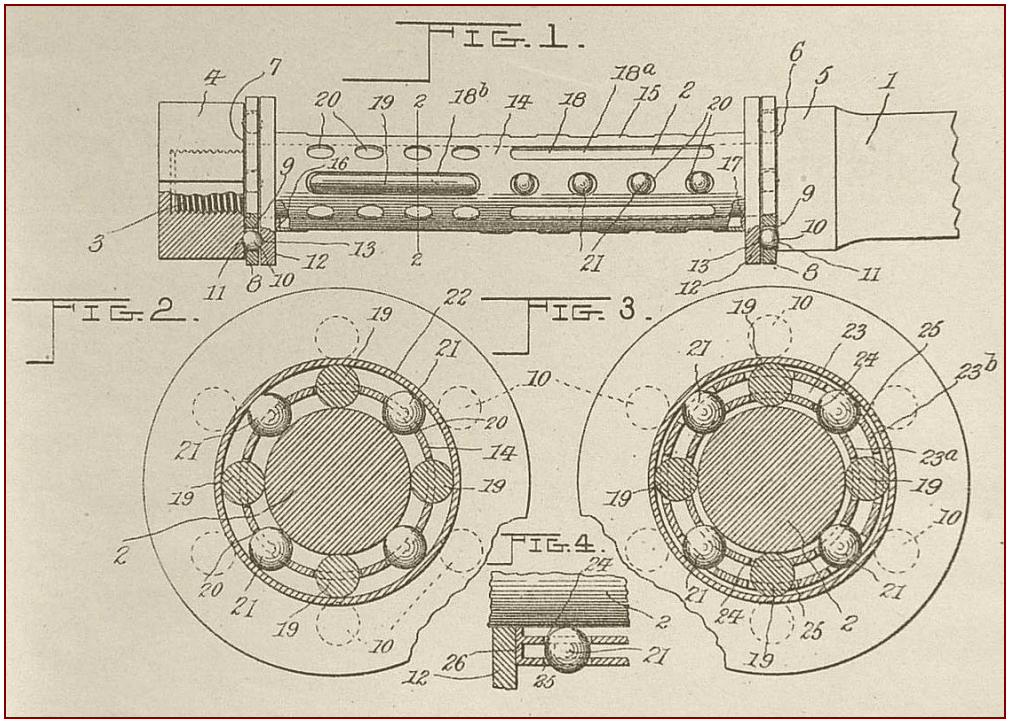
Plus tard, on renforce même l'idée en ajoutant du feutre à l'intérieur des ressorts comme le montre le brevet *(fig 73)*.



73. *Perfectionnement aux roulements et coussinets, Robert Conrad (1903).*

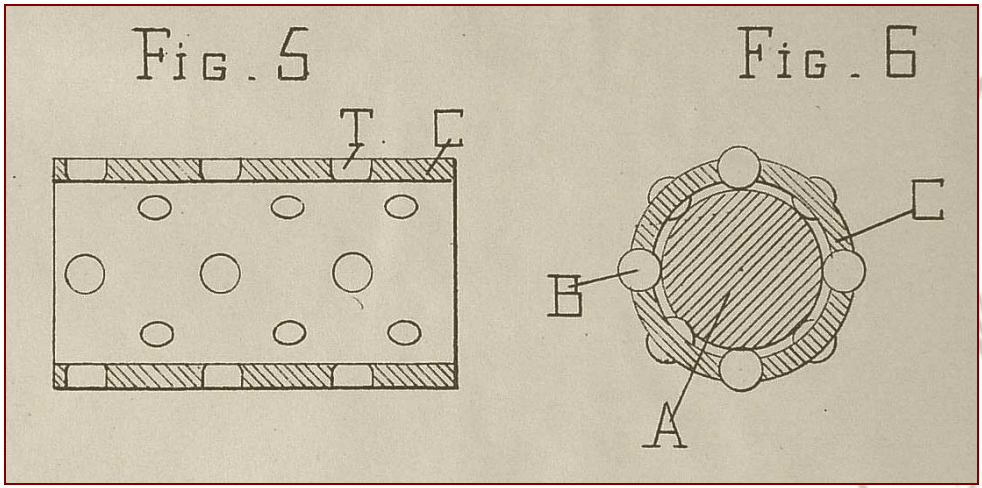
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les premières cages apparaissent à la même époque que les premiers éléments séparateurs.



74. *Coussinets à billes et à rouleaux, Headly V. Hillcoat (1903).*

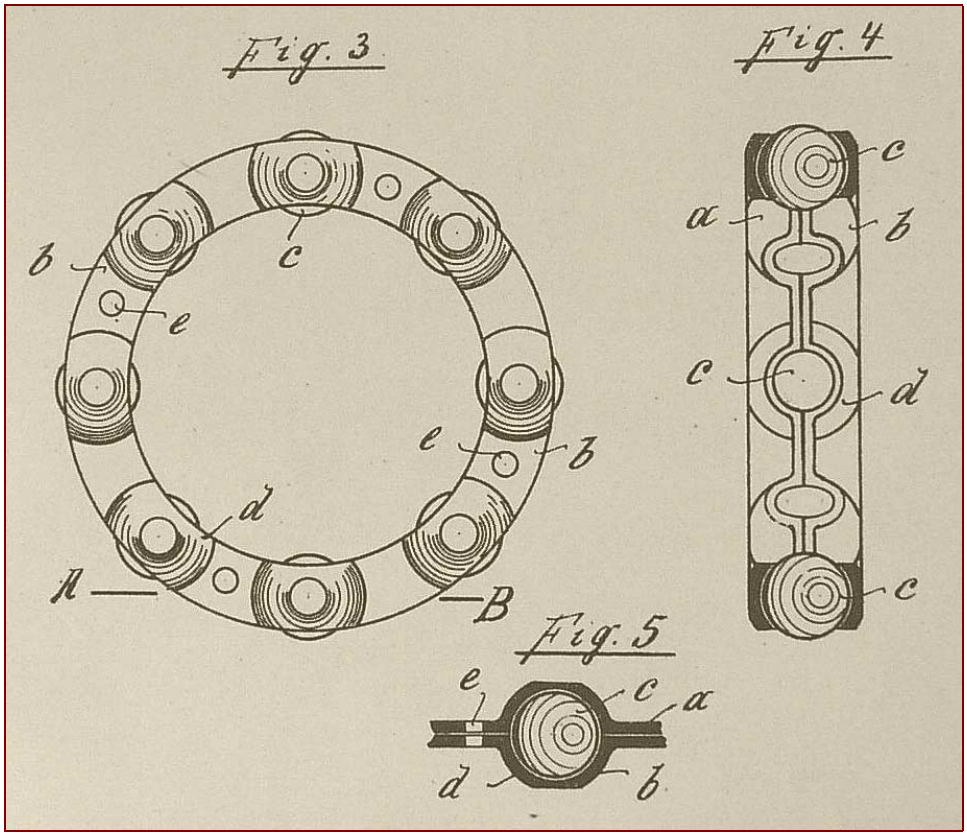
les cages du brevet *(fig 75)* sont imposantes et remplissent bien la fonction d' "emprisonner" les billes, voire mêmes billes et rouleaux combinées comme l'indique le brevet *(fig 74)*.



75. *Système de roulement à billes, Edmond Alfred Burnouf (1904).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

La cage du brevet *(fig 76)* s'apparente plus aux cages que l'on connaît aujourd'hui ; deux parties symétriques réalisés par deux tôles embouties puis agrafées ensemble au moyeu de petits rivets.



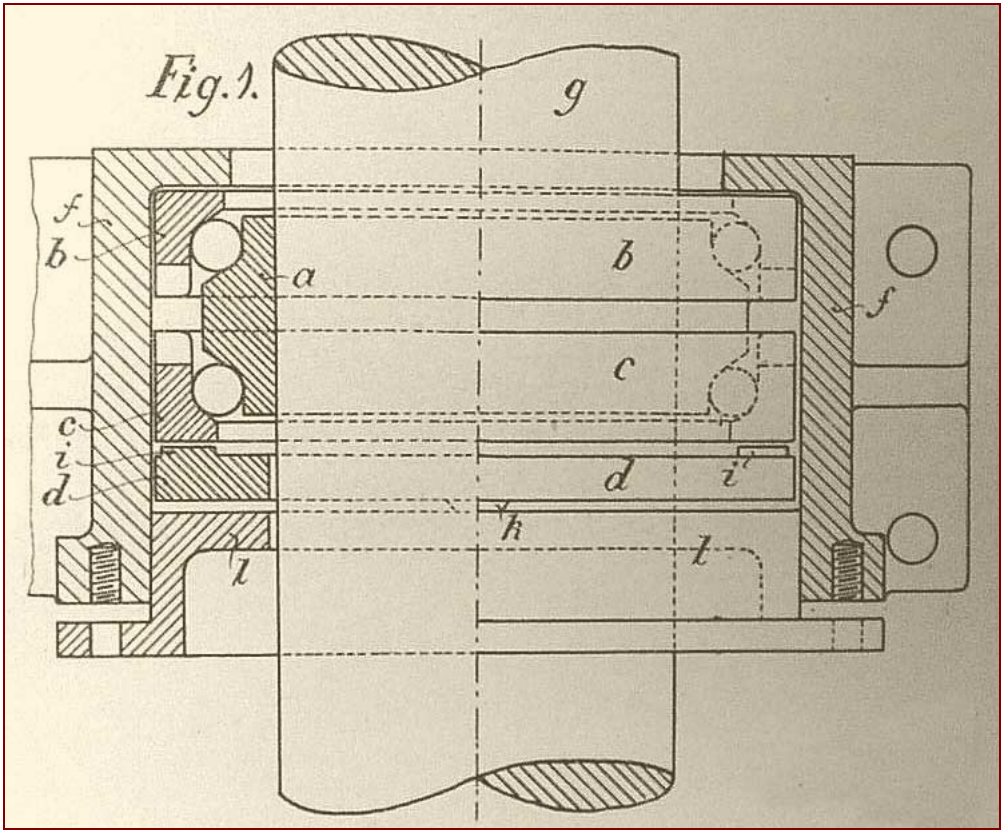
76. *Coussinet à billes, Wilhelm Höpflinger (1904).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Dépôts de brevets d'innovation relatifs au montage du roulement

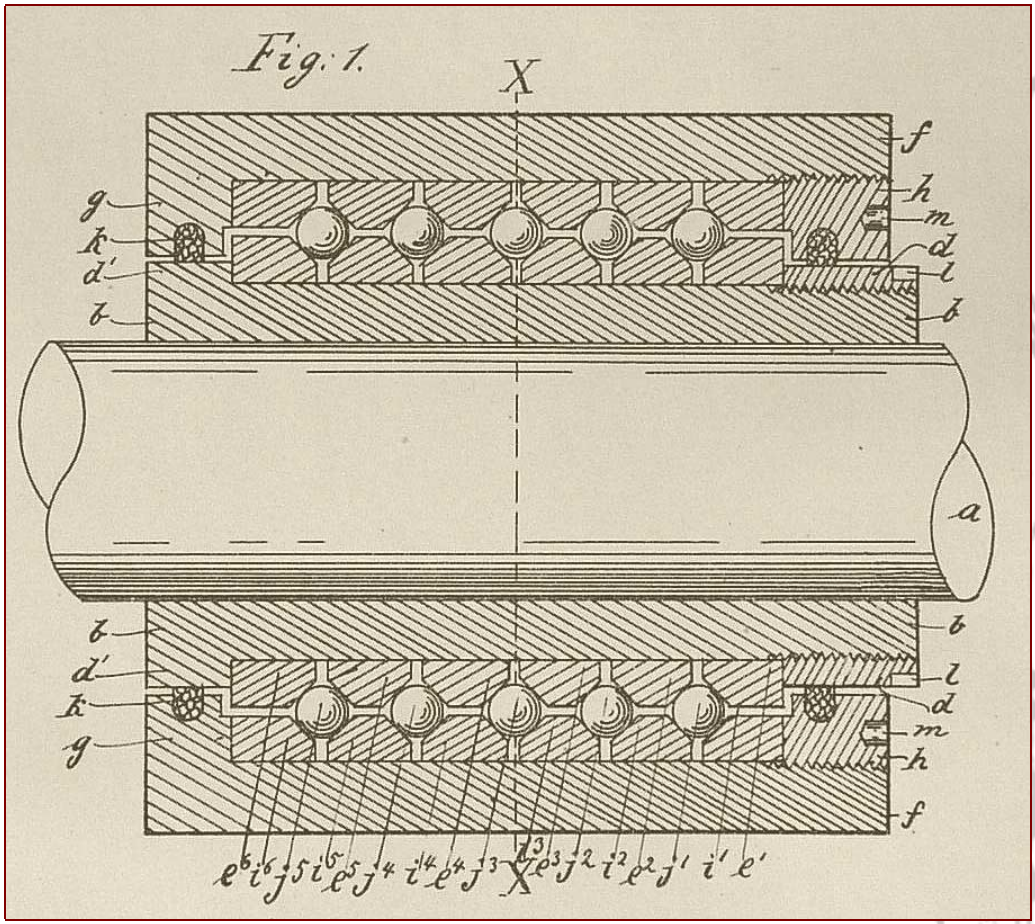
Avant que l'on ne puisse chauffer les bagues pour monter les roulements (Conrad en 1903), il faut trouver des palliatifs.

Emboîter les différents organes est alors la solution la plus évidente comme le suggère les brevets *(fig 78, fig 79, fig 80, fig 81)*, la touche finale consiste à serrer tous les éléments. Ce serrage est réalisé grâce à des bouchons filetés.



78. *Palier à billes, Heinrich Brinkmann (1902).*

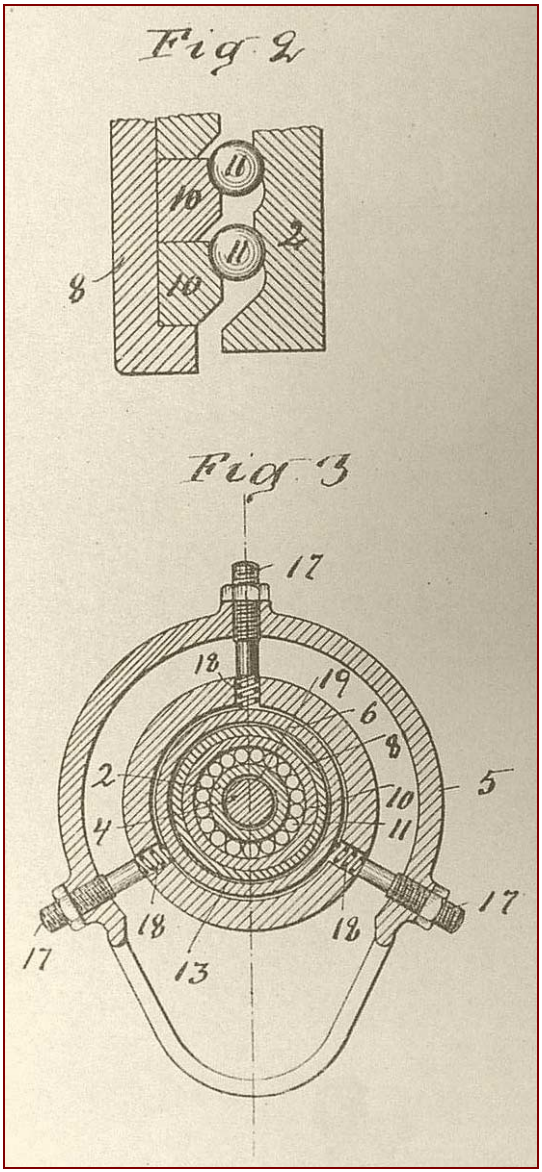
Ce procédé à ses limites, car le maintenance de tels systèmes s'avère pénible, on voit bien que le moindre changement de bague conduit à un démontage total, les billes partant dans tous les sens !



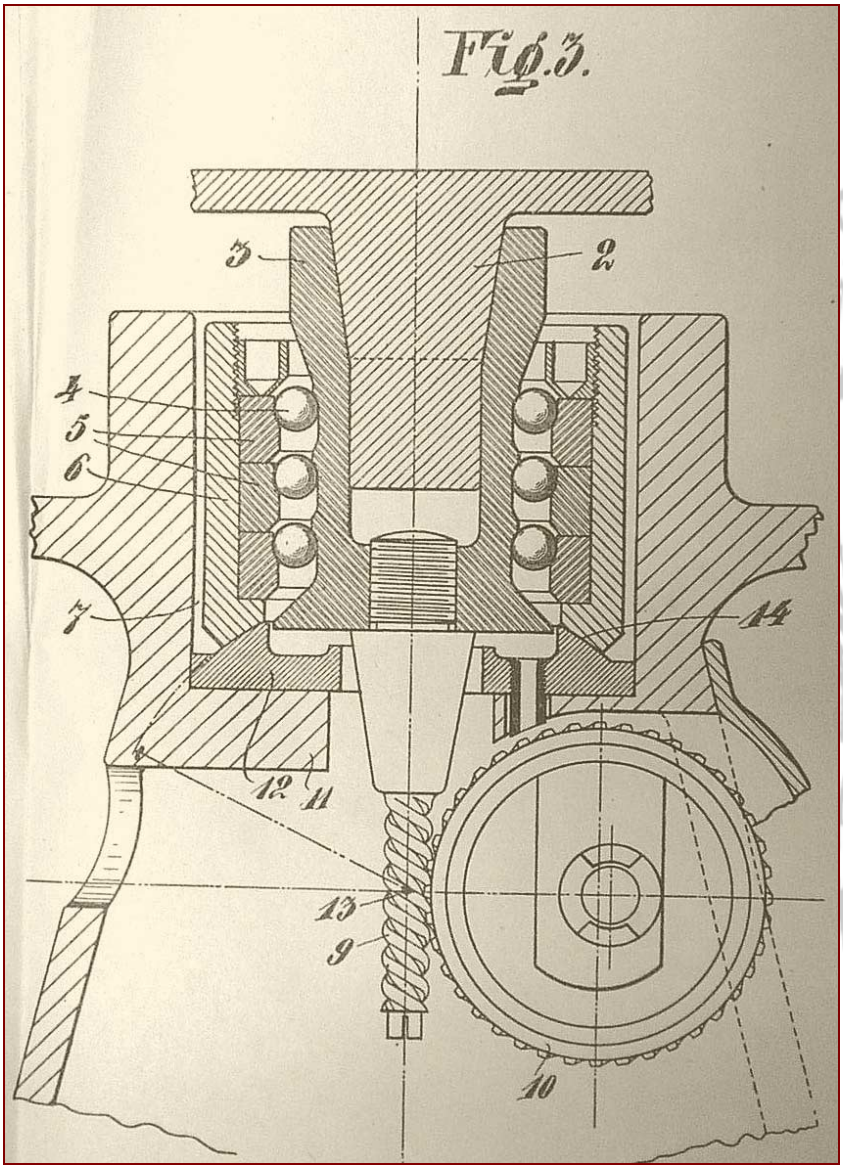
79. *Coussinet à billes, Milo Harris (1903).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

A noter que le système du brevet *(fig 78)* sera décliné légèrement pour devenir plus tard le roulement à contact oblique, l'inclinaison des contacts permettant d'encaisser les efforts axiaux.



80. *Coussinet d'appui pour axe de centrifuges, Olof Ohlsson (1902).*

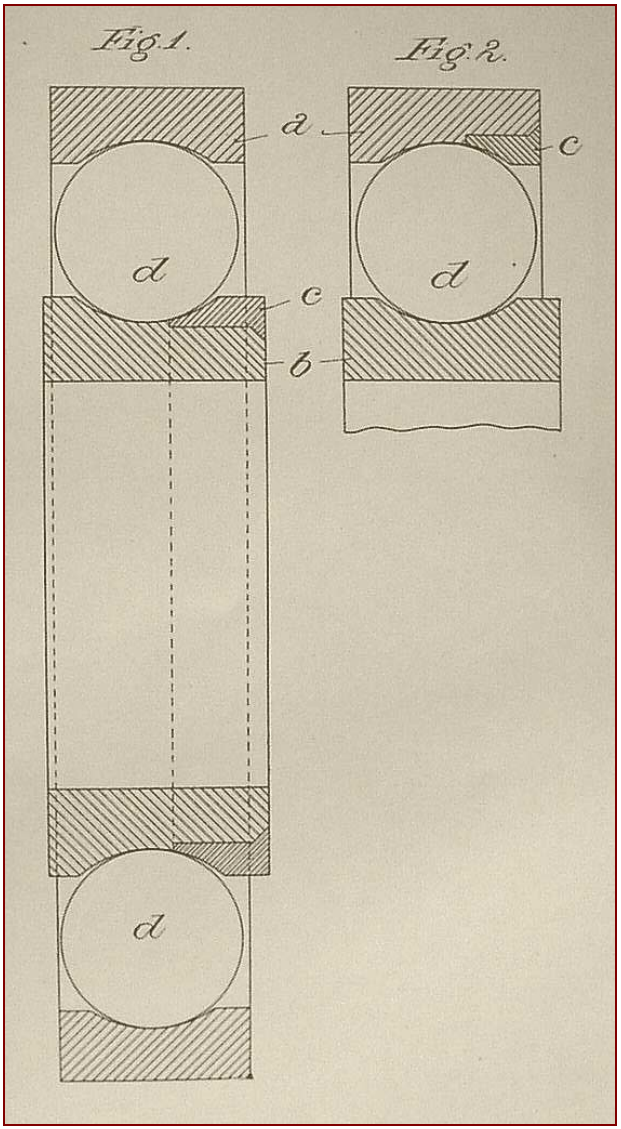


81. *Dispositif de roulement pour rotations rapides, Olof Ohlsson (1902).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

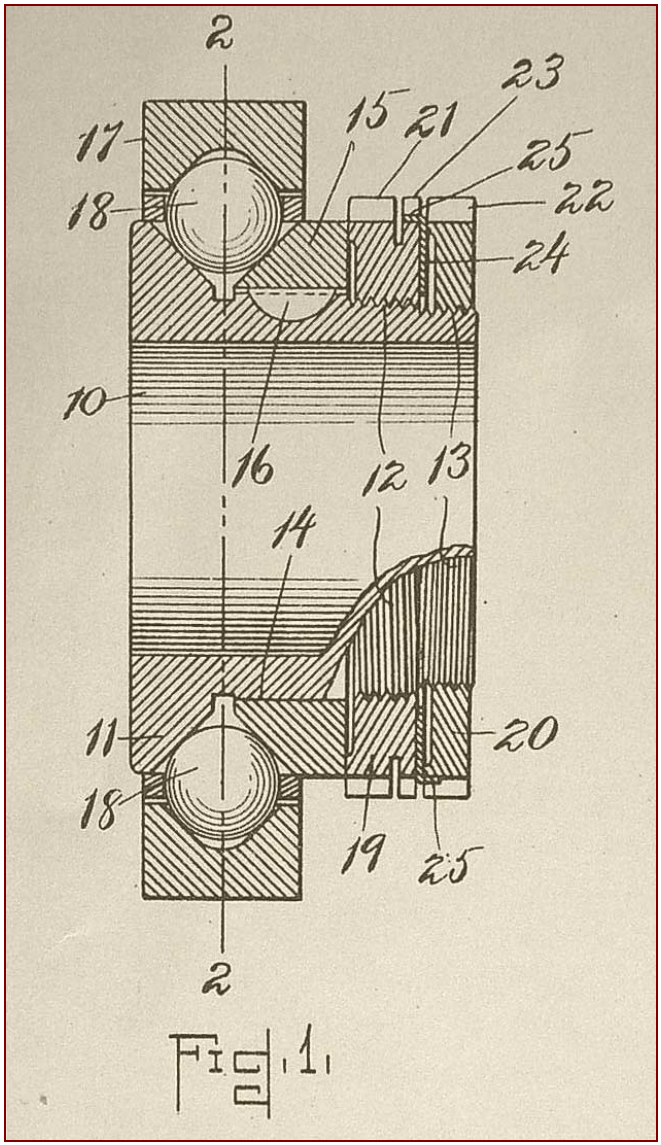
Toujours dans le but de répondre au montage des roulements, des systèmes basés sur des démontages partiels apparaissent.

Le principe consiste à diviser la bague intérieure ou extérieure comme le montrent les bagues du brevet *(fig 82)*, à introduire les éléments tournants, puis à remonter la bague, pour cela on filete une bague du roulement.



82. *Dispositif de roulements à billes, Sté Erste Automatische G. (1904).*

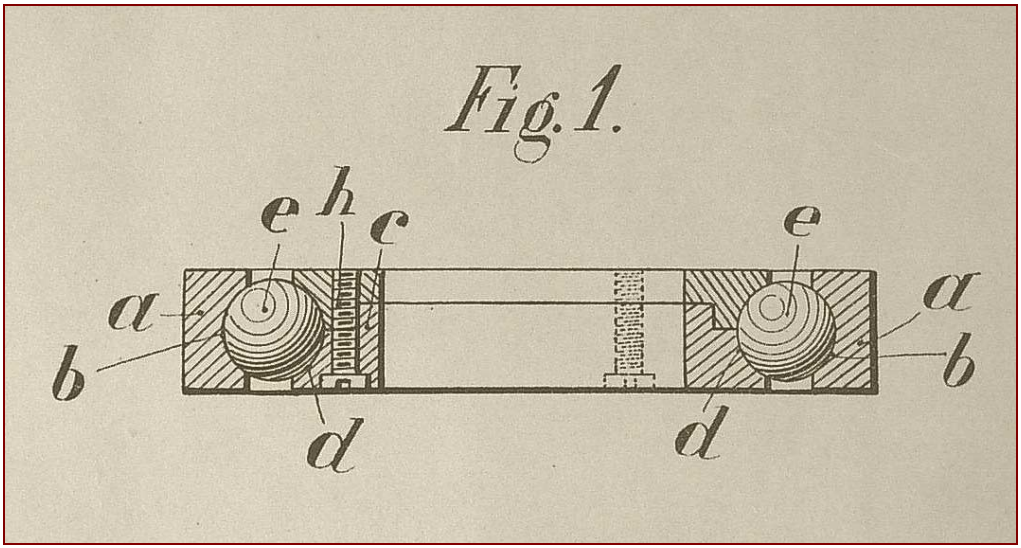
Ce principe peut quand même s'avérer complexe à réaliser du fait du jeu que laisse les pas de vis, c'est le cas du brevet *(fig 83)* qui essaie de supprimer ce jeu par l'emploi de dispositif " contre-écrous ".



83. *Coussinet à billes, Marcellus Reid (1903).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

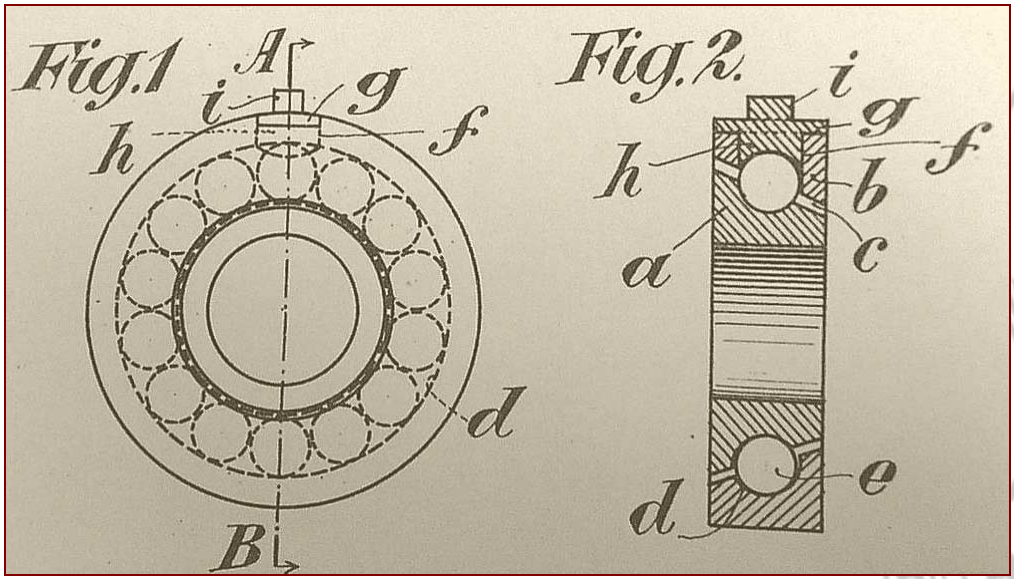
Le roulement du brevet *(fig 84)* est basé sur le même principe que précédemment, la différence venant du fait que ce sont de petites vis qui assurent le maintien de la bague intérieure.



84. *Roulements à billes, Auguste Cambon fils (1904).*

Des encoches de remplissage permettent de s'abstenir du montage par " chauffe " de Conrad.

En perçant une petite encoche de la bague extérieure du brevet *(fig 85)*, on peut placer les billes unes à unes puis refermer la bouchon par force (maillet…).

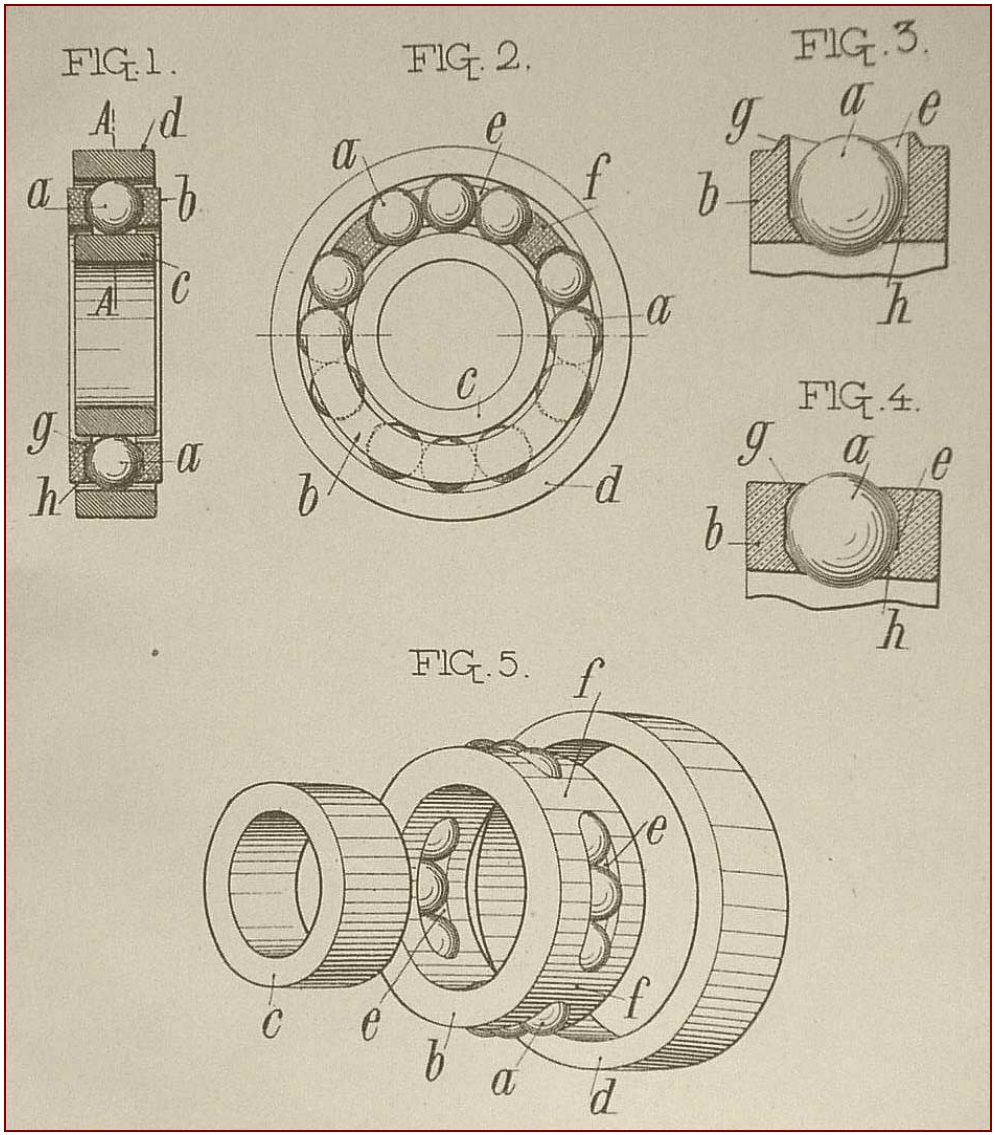


85. *Couronne de roulement pour coussinet à rouleaux, J. Schmid-Roost (1903).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

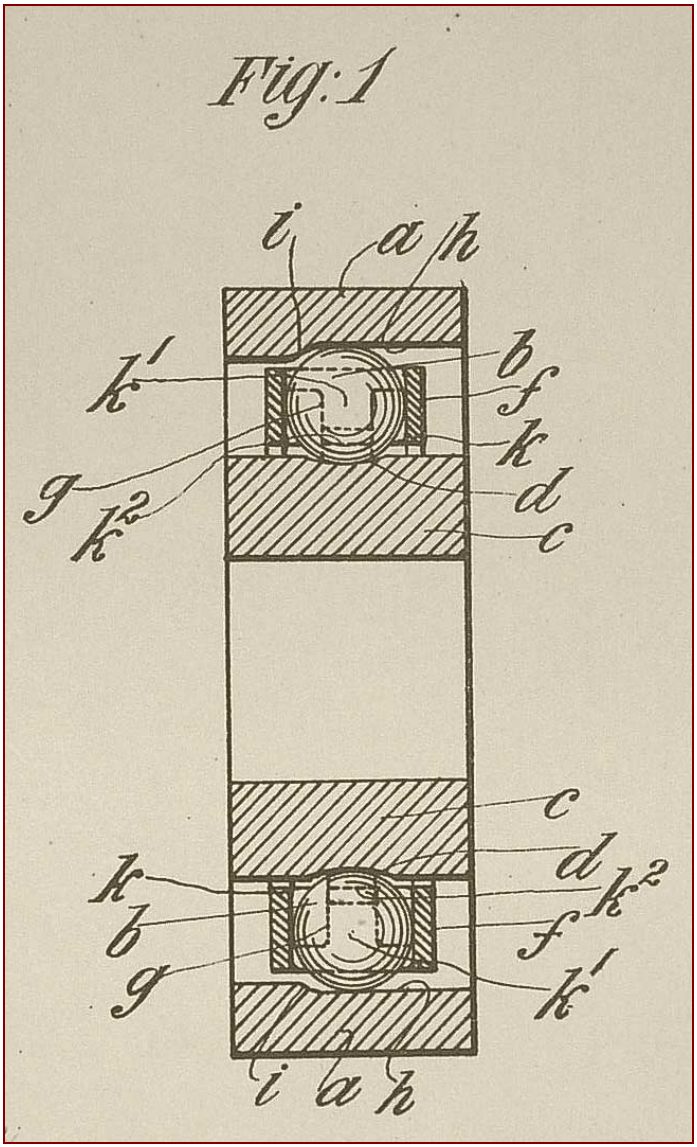
Le roulement du brevet *(fig 86)* est ingénieux, pour répondre aux problèmes de montage et de maintien des billes dans le roulement. Pour cela, la cage est usinée de telle façon à recevoir trois billes ; on place deux billes aux extrémités de ces lumières, la dernière joue le rôle de clé de voûte et permet à l'ensemble de se maintenir.

Toutefois, même si il est réduit, le problème du contact des billes est toujours présent. La cage coulisse dans les deux bagues pour monter le roulement final, donc l'ensemble ainsi réalisé n'est pas indépendant.



86. *Roulements à billes, Sté J. Sapène (1904).*

Le roulement du brevet *(fig 87)* se monte par emboîtage successif des éléments. Seule la bague extérieure est mobile.

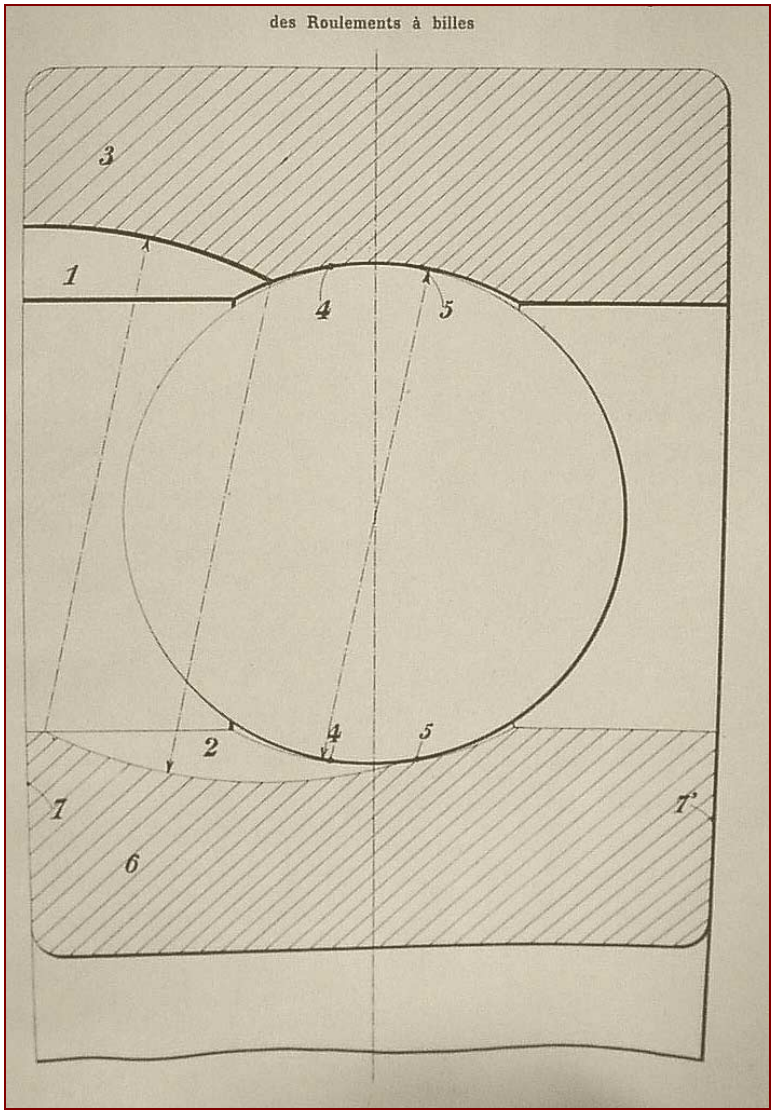


87. *Perfectionnement aux roulements à billes, Ernest Gustav Hoffmann (1904).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les brevets *(fig 88, fig 89)* sont de bons exemples en terme de montage de roulement.

Le roulement de gauche *(fig 88)* consiste en un usinage précis des bagues intérieures et extérieures de sorte à pouvoir insérer les billes et que celles-ci restent à l'intérieur du logement une fois le roulement emboîté.

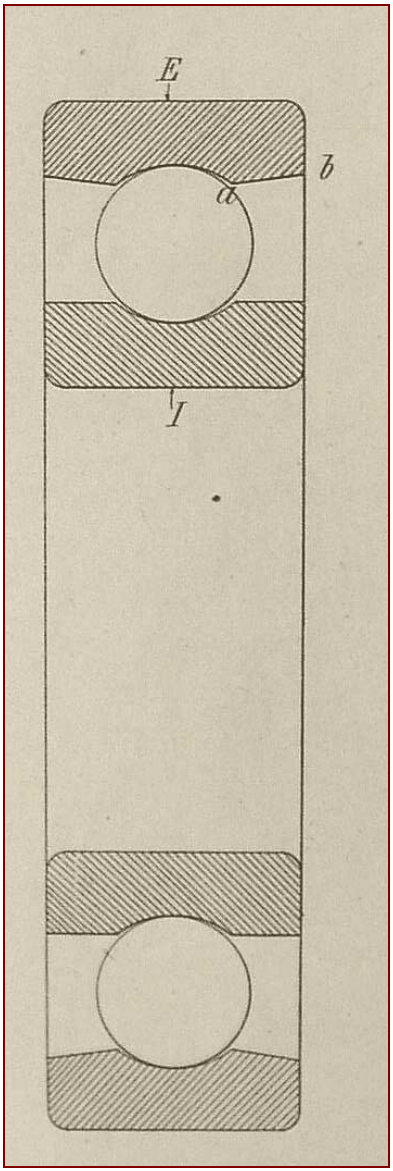


88. *Perfectionnement aux roulements à billes, Sté Française de Roulements (1904).*

Quant à lui, le roulement du brevet *(fig 89)* est monté par léger chauffage de la bague extérieure et par refroidissement de la bague intérieure.

Les dimensions sont choisis de façon à pouvoir emboîter le tout. Les formes inclinées permettent d'entrer les billes facilement tout en garantissant l'impossibilité de sortir.

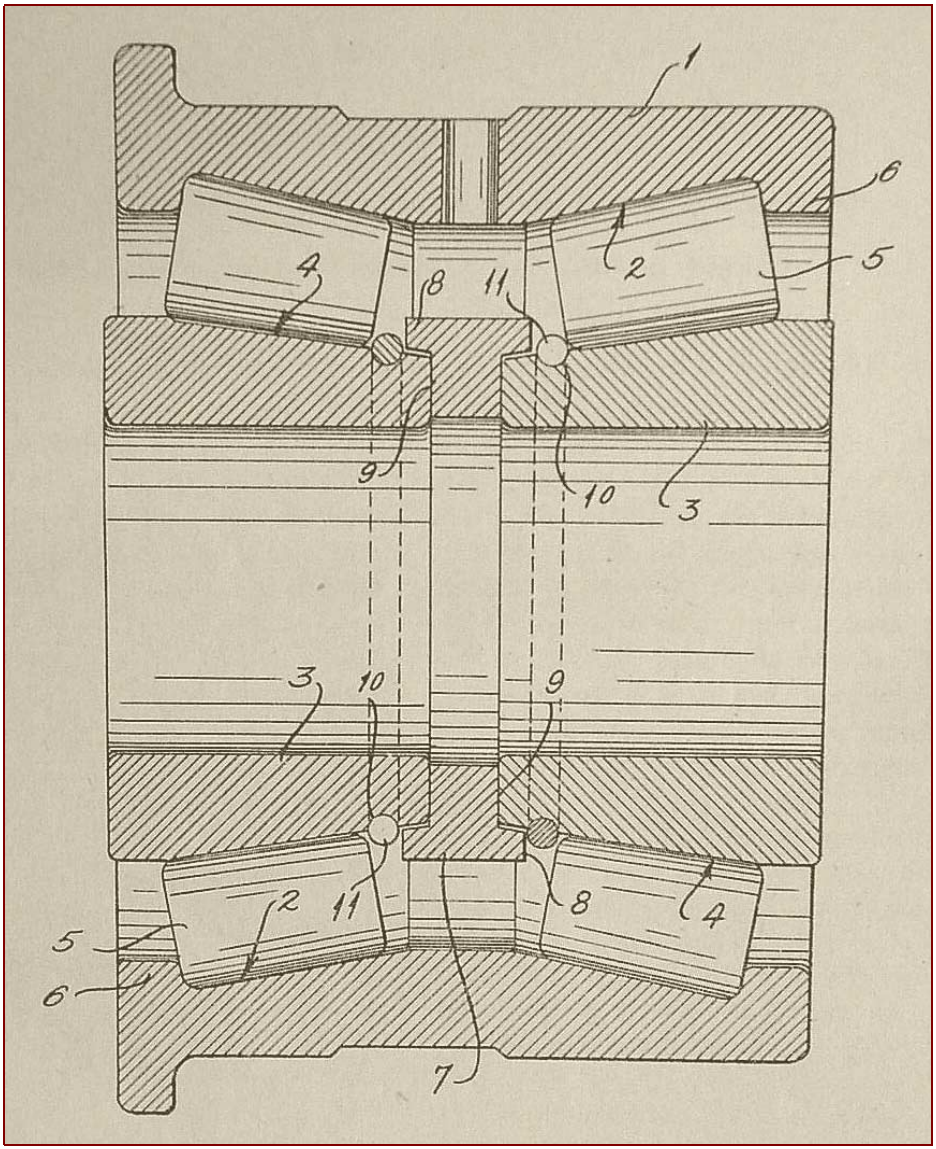
Cette méthode de montage est l'une des plus abouties et reste l'une des plus utilisées.



89. *Dispositif de roulement à billes, Laussedat (1910).*

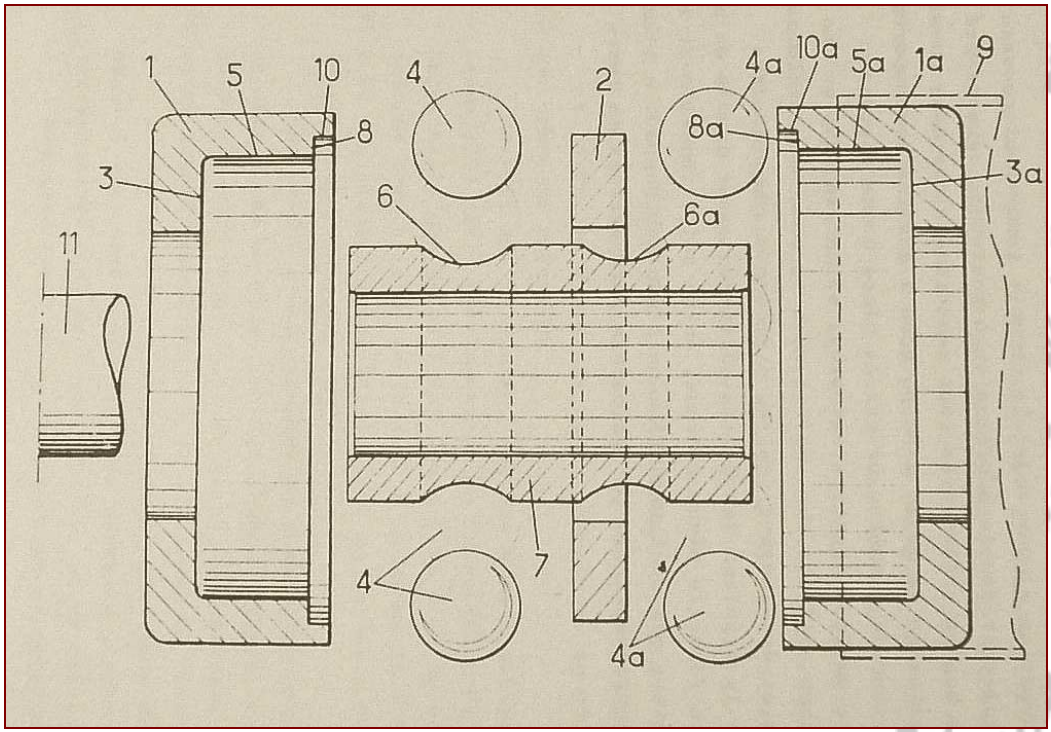
"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les roulements des brevets *(fig 90, fig 91)* sont dits " roulements double " à rouleaux coniques comme le brevet *(fig 90)* et à double à billes comme le brevet *(fig 91)*.



90. *Perfectionnement relatif à des roulements doubles, Sté Timken (1950).*

La mise en opposition de deux roulements facilite le montage (on l'avait entraperçu avec le brevet (fig 78) puisque il s'effectue uniquement par serrage. Mécaniquement, cela se traduit par une plus grande aptitude devant certaines charges, notamment les porte-à-faux.



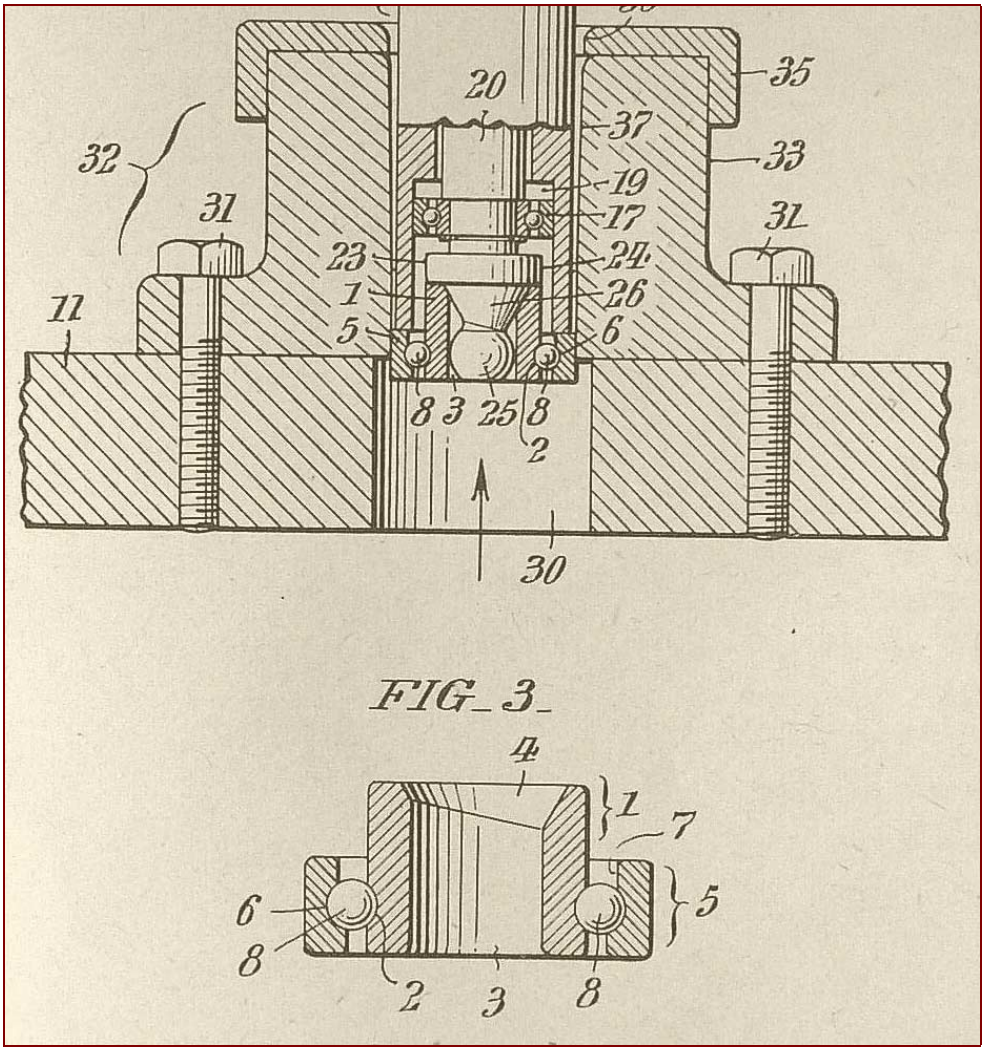
91. *Roulement double à cuvettes embouties, Sté S.K.F. (1970).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Pour finir cette partie sur le montage des roulements, le roulement du brevet *(fig 92)* est un exemple d'usinage de l'arbre permettant de contourner les traditionnels montages arbre/roulement dont les plus courants sont : circlips, écrou à encoches, ….

L'arbre est usinée en forme de cône excentré par rapport à l'axe du roulement. Si bien que la bague intérieure est usinée de façon à épouser parfaitement l'arbre.

Cette invention est particulièrement ingénieuse, peut être réservée à des vitesses peu élevées du fait de l'inertie notamment.



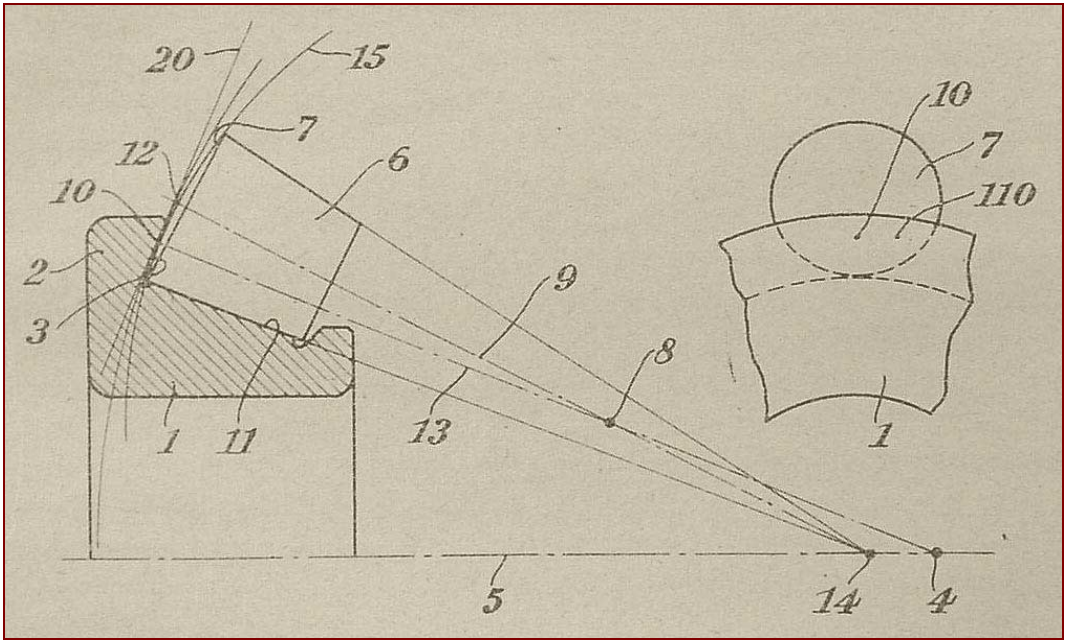
92. *Roulement sans friction, Sté Chaning Corporation (1960).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Dépôts de brevets d'innovation relatifs au contact mécanique

Parmi les contraintes existantes et auxquelles il a fallu répondre, se trouve le problème du contact entre les éléments tournants et les bagues, notamment les billes. En effet, les bagues ne doivent pas épouser parfaitement les billes, le contact doit être le plus limité possible. C'est la définition même du roulement sans quoi on retombe dans le glissement !

Un à deux points de contacts par bague sont donc suffisants. Le roulement du brevet *(fig 93)* est à rouleaux conique, le contact est linéique, seul la base du rouleau gène la rotation. Pour cette raison, on le bombe légèrement (grand rayon) de sorte à réduire la surface de contact à un point.

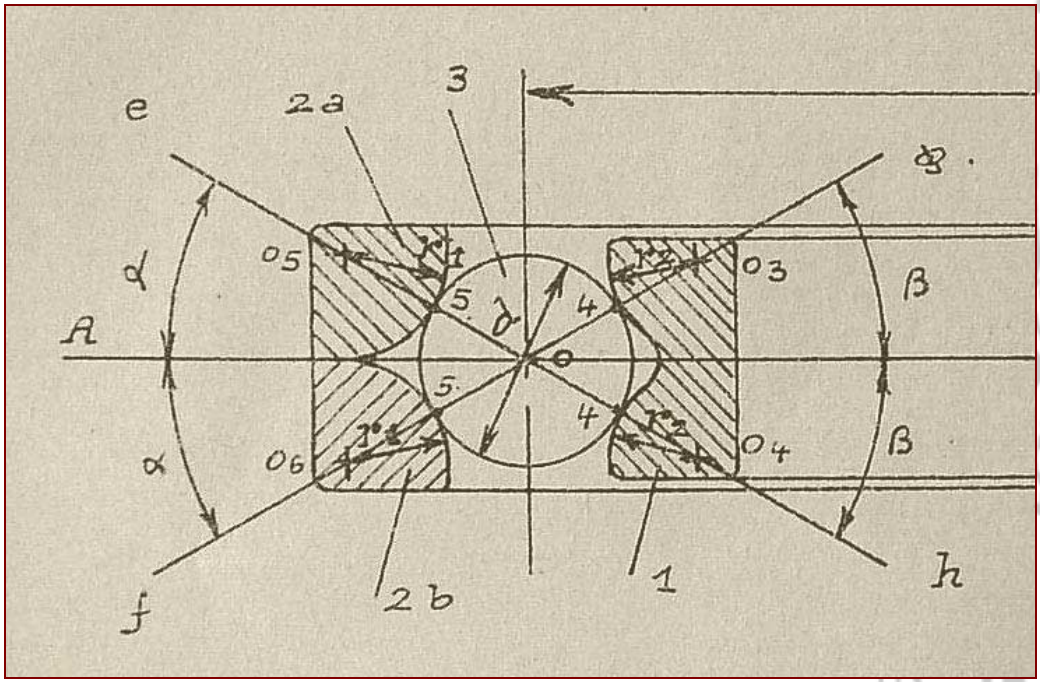


93. *Roulement à rouleaux, A. E. Bratt (1940).*

L'usure des roulements se produit au niveau des éléments tournants. Quelque soit la matière employée pour la réalisation des billes, on ne pourra jamais empêcher leur " ovalisation ".

Ce phénomène provient du fait que le contact se réduit à un point de part et d'autre de la bille, d'où une pression de contact sur la bille.

Le roulement du brevet *(fig 94)* à été imaginé dans ce sens, en augmentant les points de contact à deux (sur chaque bague) les pressions de contacts sont différents, ce qui réduit cette " ovalisation ".



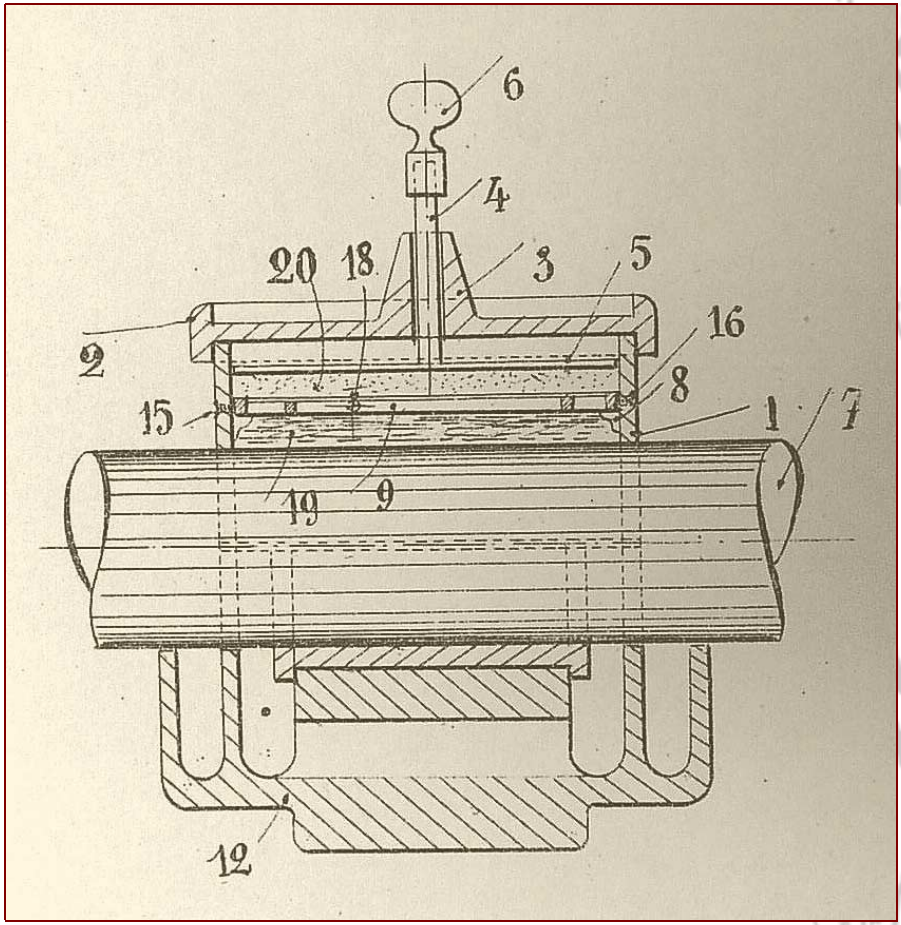
94. *Roulement à billes nouveau et protection, Frenkel (1950).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Dépôts de brevets d'innovation relatifs à la lubrification

Pour bien fonctionner, les roulements doivent pouvoir être lubrifié. Un accès pour la graisse ou l'huile est donc nécessaire.

Le palier du brevet *(fig 95)* est équipé d'un bouchon graisseur repéré ***{6}*** et permet la lubrification.

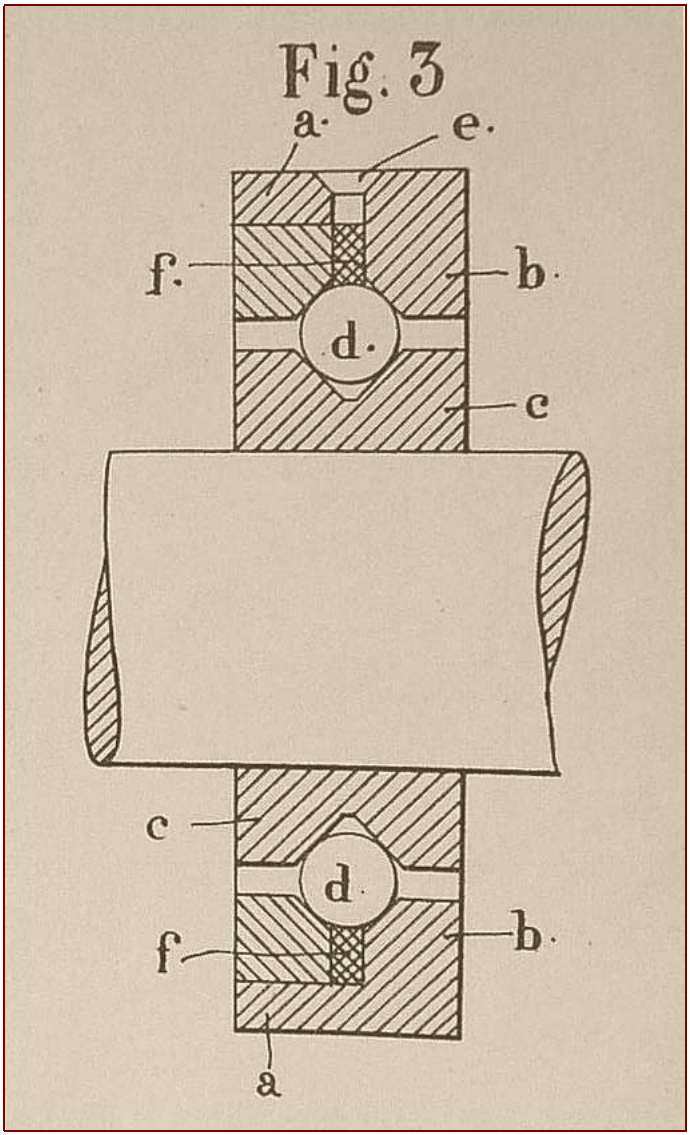


95. *Perfectionnements au graissage des paliers, William-Arthur Young (1902).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Le roulement du brevet *(fig 96)* est muni d'un petit perçage qui permet l'introduction de l'huile, le montage s'effectue par séparation de la bague extérieure.

Lors de l'emboîtement une rondelle de feutre est insérée, cette rondelle retient l'huile et permet une lubrification au goutte à goutte.

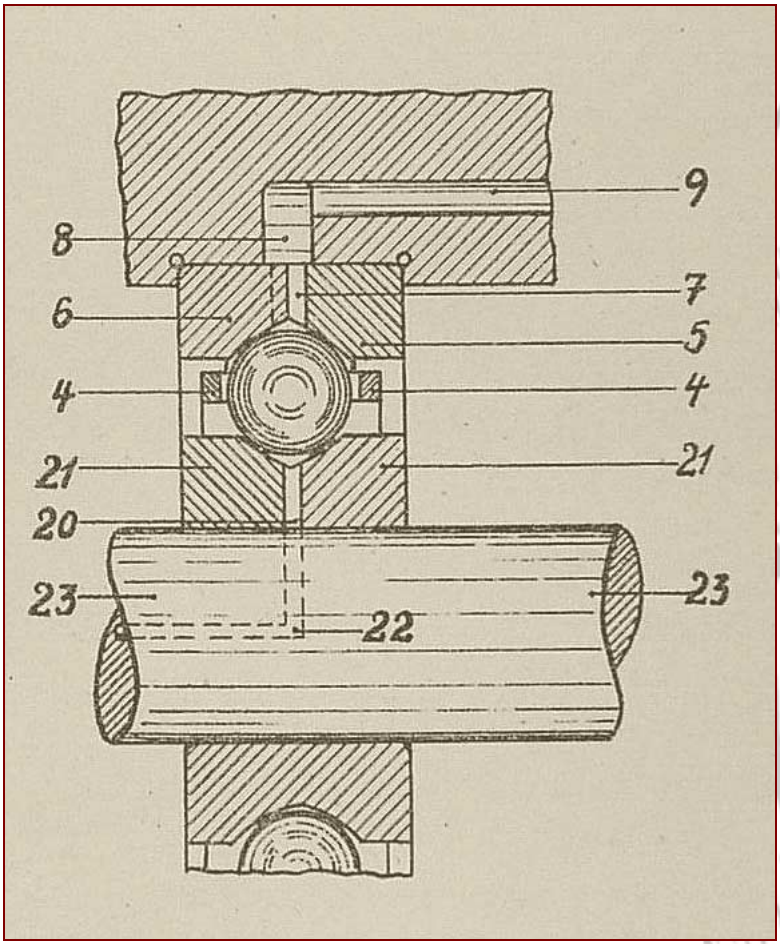


96. *Système par roulement à billes, Auguste-Marie Michel (1904).*

Le roulement du brevet *(fig 97)* est percé sur la bague intérieure et extérieure afin de laisser passer l'huile.

L'arbre est aussi percé par son axe, l'huile provenant du roulement peut ainsi peut être véhiculé dans le mécanisme.

On notera quand même que l'usinage de l'arbre le fragilise grandement.



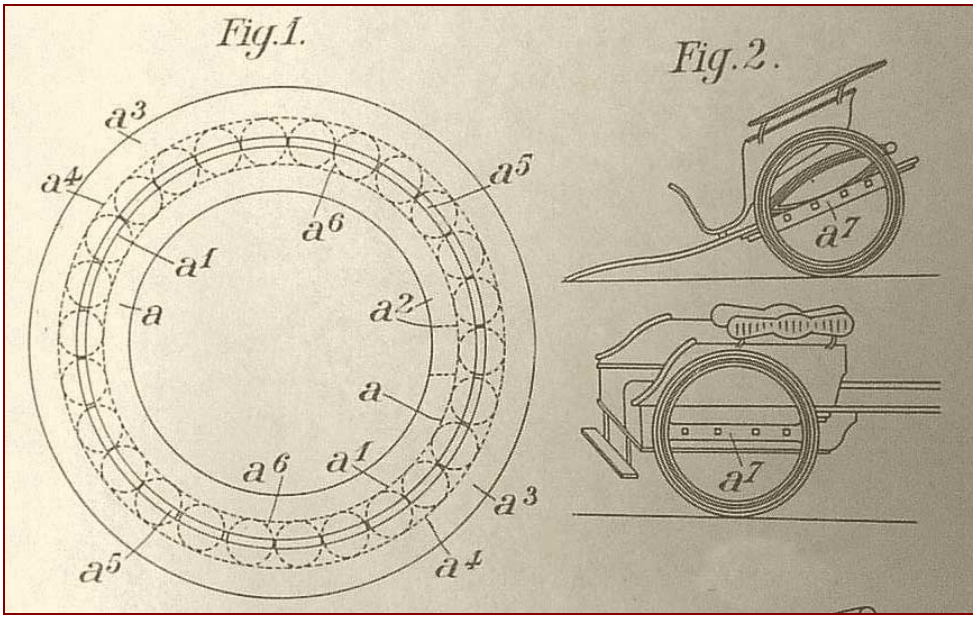
97. *Roulement pour vitesses de rotation élevées, Sté Junkers F.M.A. (1940).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

De tous les brevets de ce mémoire, il en demeure des "inclassables". Le mot *"roulement"* apparaissaient pourtant dans leur titre de dépôt. Les concepts qui sortent de ces brevets sont sûrement les précurseurs de technologies mécaniques que nous connaissons aujourd'hui sous d'autres noms que *"roulement"*; ce sont les vis à billes, rouleau à billes, ...

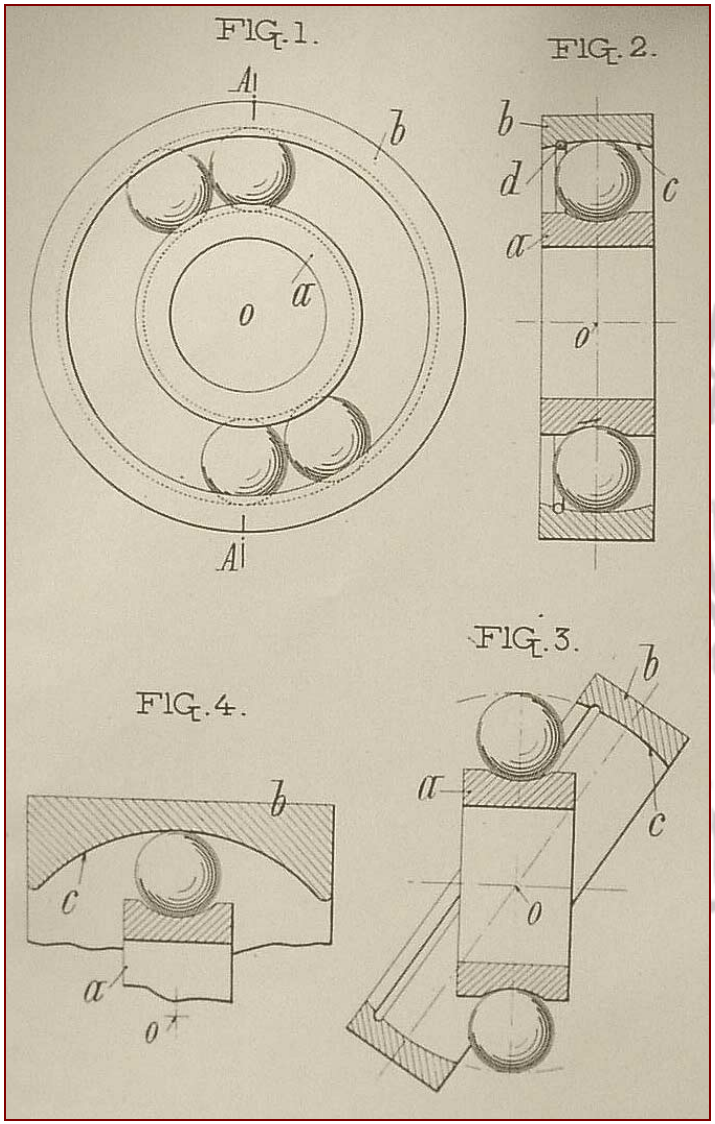
Ce concept de " grand " roulement évoqué par le brevet *(fig 98)* est assez particulier. Adaptés sur les charrues, il casse les conventionnels essieu-moyeu, puisque le roulement et la roue ne font qu'un.

L'idée est amusante quoique sûrement très bruyante.



98. *Système de roulement à billes, Davies (1902).*

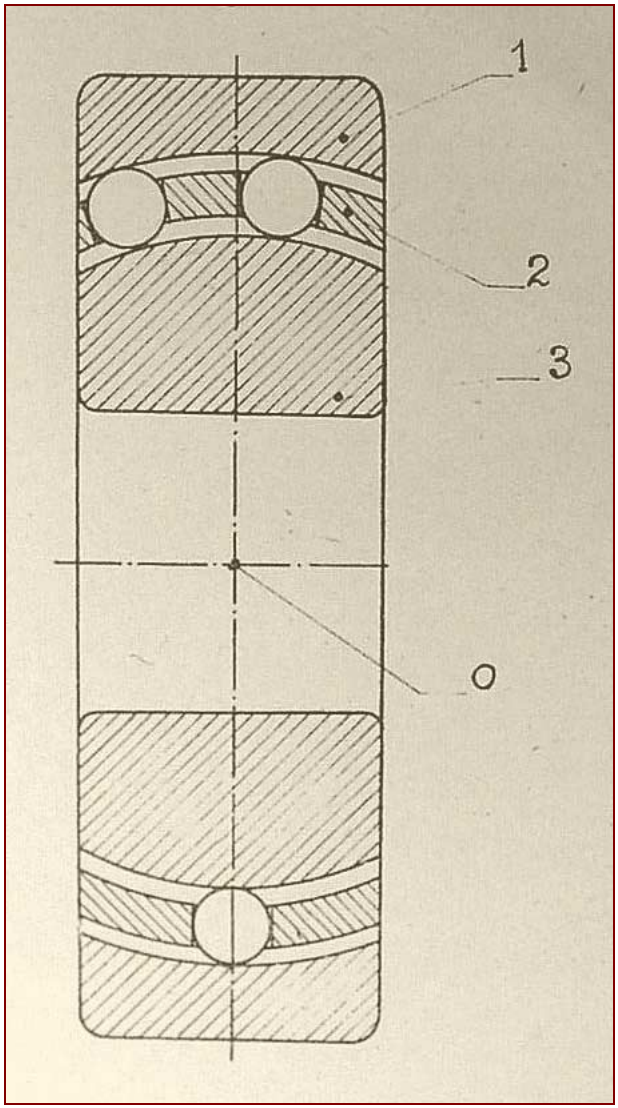
Les roulements des brevets *(fig 99, fig 100, fig 101)* ont étés inventés pour faciliter le montage. La bague intérieure peut pivoter pour introduire les billes.



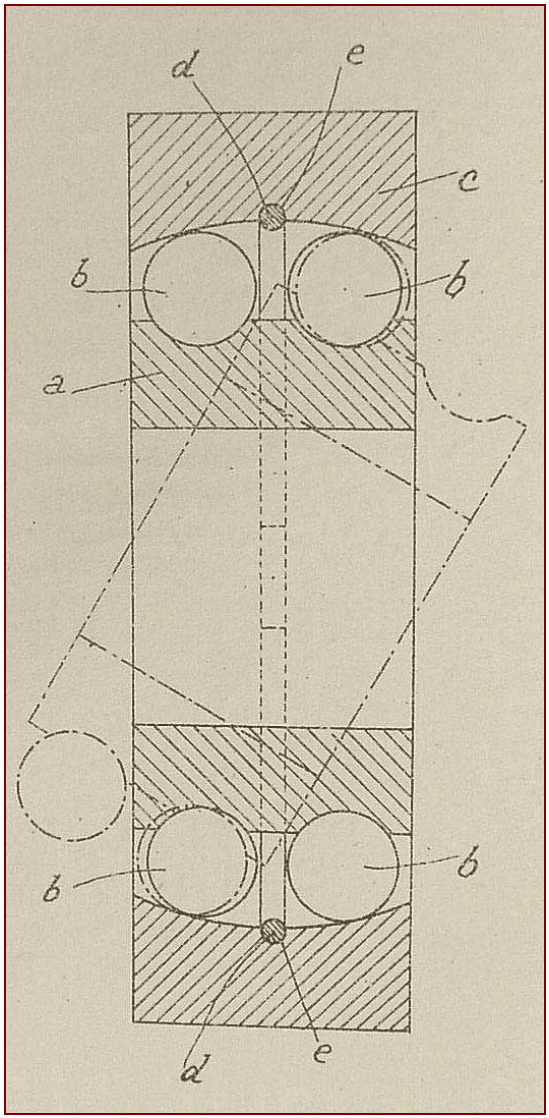
99. *Roulement à billes sphéro-annulaire, Sté Malicet et Blin (1904).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Ces roulements permettent par là même un débattement angulaire de l'arbre d'une quinzaine de degrés, ce qui en font des précurseurs des actuels roulement à rotule.



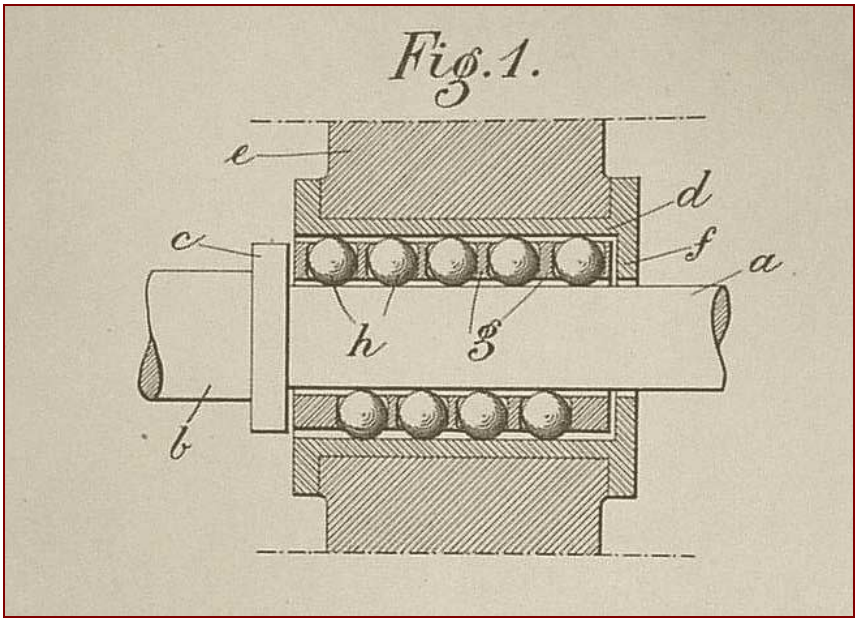
100. *Roulement à billes, Beduneau (1920).*



101. *Roulement à rotule à deux rangs de billes sans cage, Beduneau (1940).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

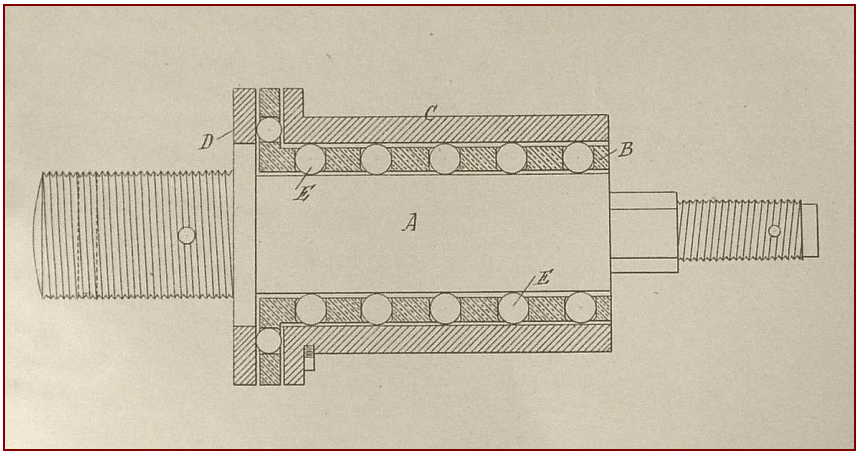
Le roulement du brevet *(fig 102)* est utilisé pour les guidages longs, c'est le même système utilisé dans les pédaliers de bicyclette *(fig 51, fig 52)*.



102. *Perfectionnements aux roulements à billes, Auguste Georges Latil (1904).*

Le roulement du brevet *(fig 103)* permet d'encaisser les efforts axiaux.

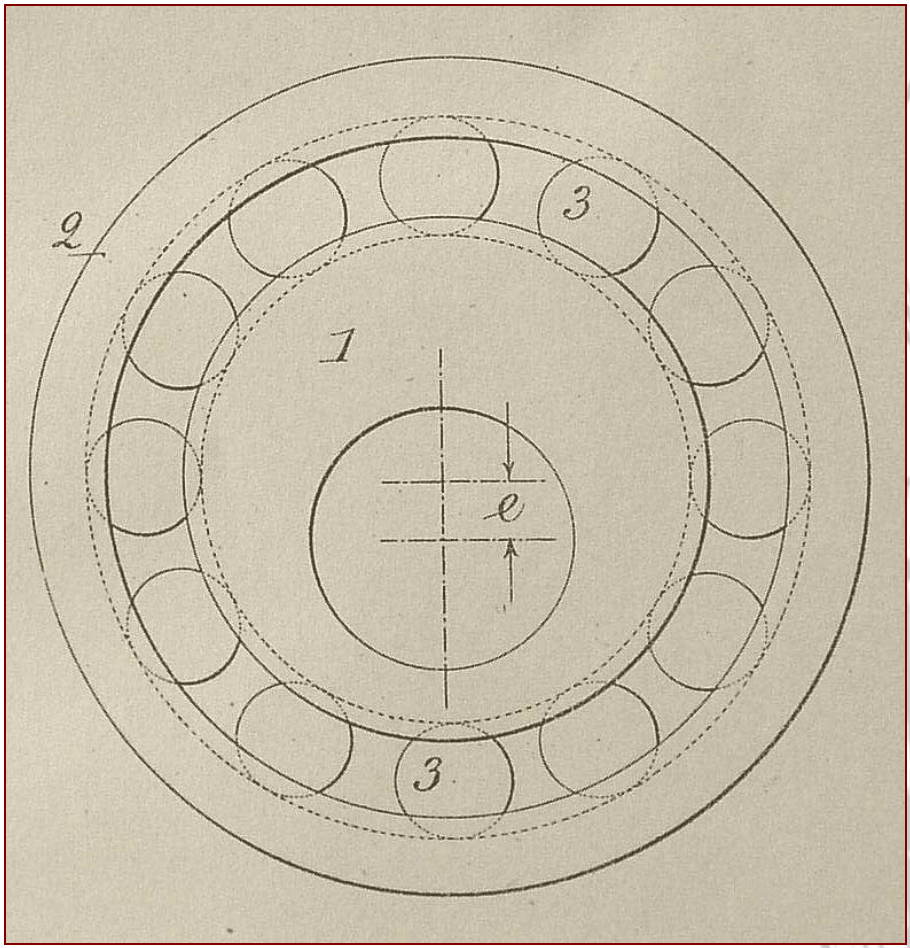
C'est en fait l'ancienne version des roulements combinés ; roulement et butée combinés dans un seul roulement.



103. *Roulements à billes applicables aux roues, Camille Hautier (1904).*

Le roulement du brevet *(fig 104)* est un roulement de type excentré.

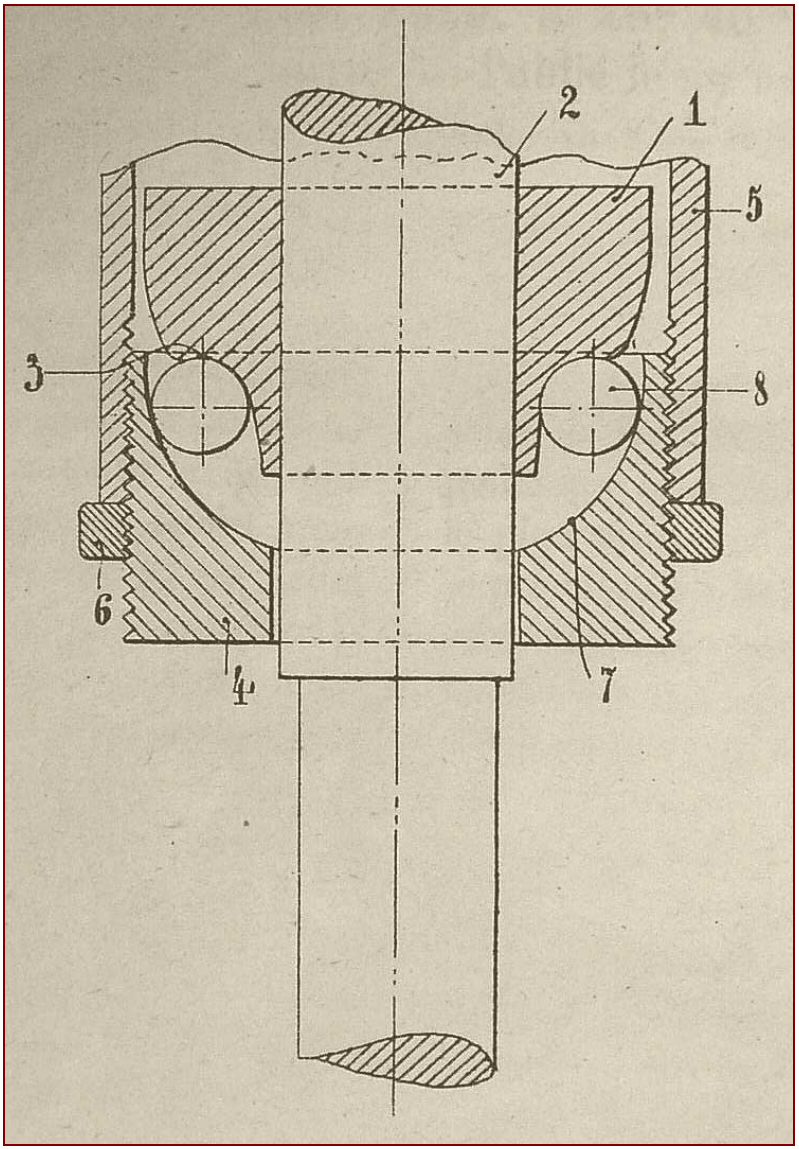
Evidemment, d'un point de vue dynamique celui-ci ne doit pas être soumis à des vitesses de rotation élevées.



104. *Coussinet à billes excentré, Cie Française D.W.F. (1910).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

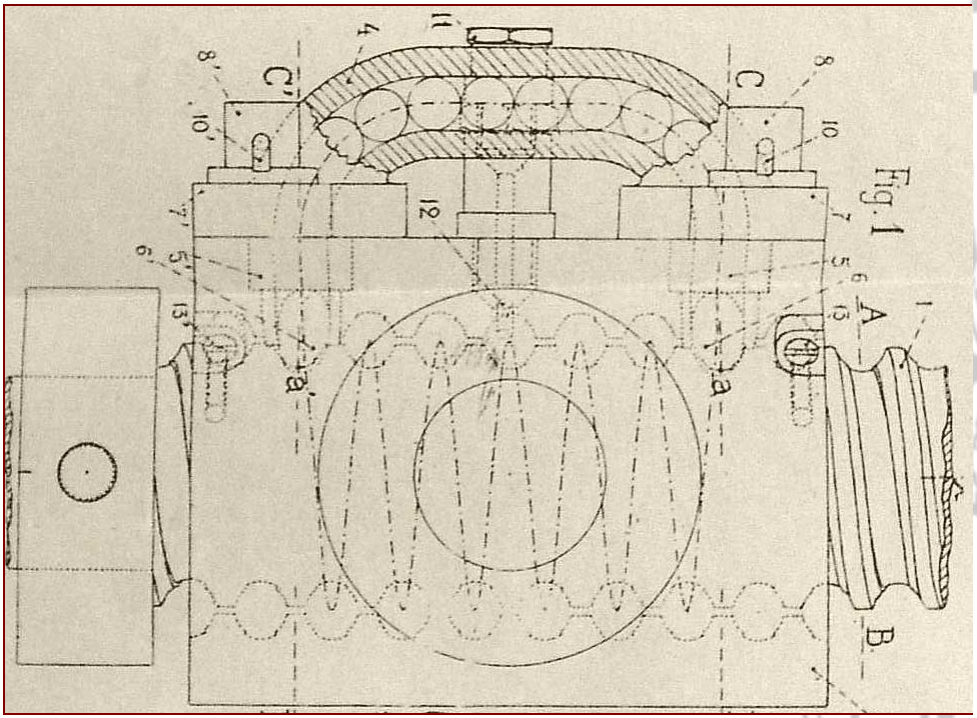
Le roulement globique du brevet *(fig 105)* est très proche des roulements à contact oblique, le jeu est réglé par une bague de serrage qui comprime les billes suivant un angle à 45°, les efforts radiaux et axiaux sont donc bien supportés.



105. *Roulement à billes globique, Rosengart (1920).*

Le roulement du brevet *(fig 106)* est à " recyclage de billes ".

C'est l' innovation la plus proche de la vis à billes basée sur l'idée d'une vis dans laquelle les filets sont remplacées par des billes.

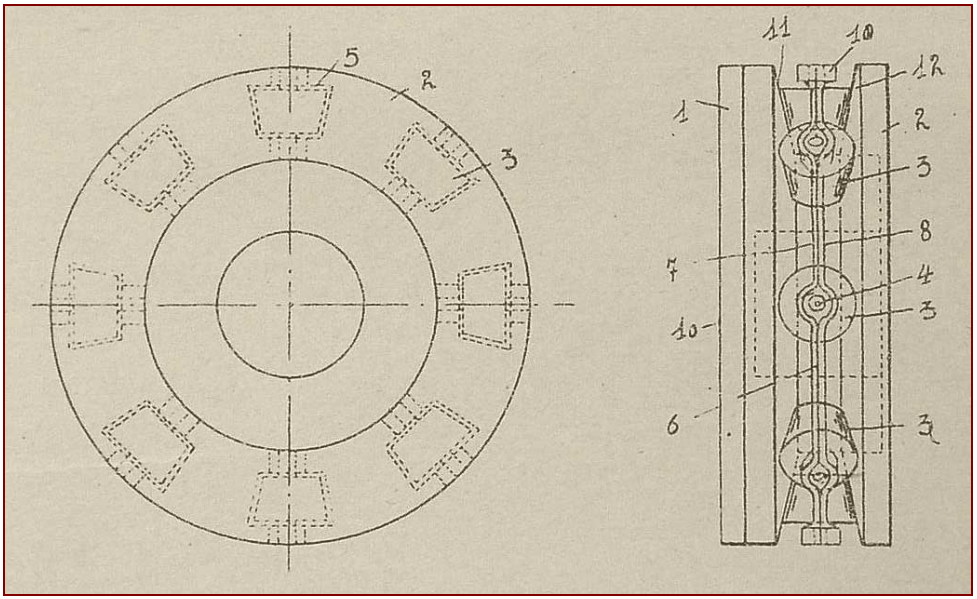


106. *Roulement à billes universel, Limon (1930).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Le roulement du brevet *(fig 107)* possède des éléments tournants coniques permettant de supporter les efforts axiaux.

C'est sans doute un précurseur de la butée à rouleaux ou à billes.

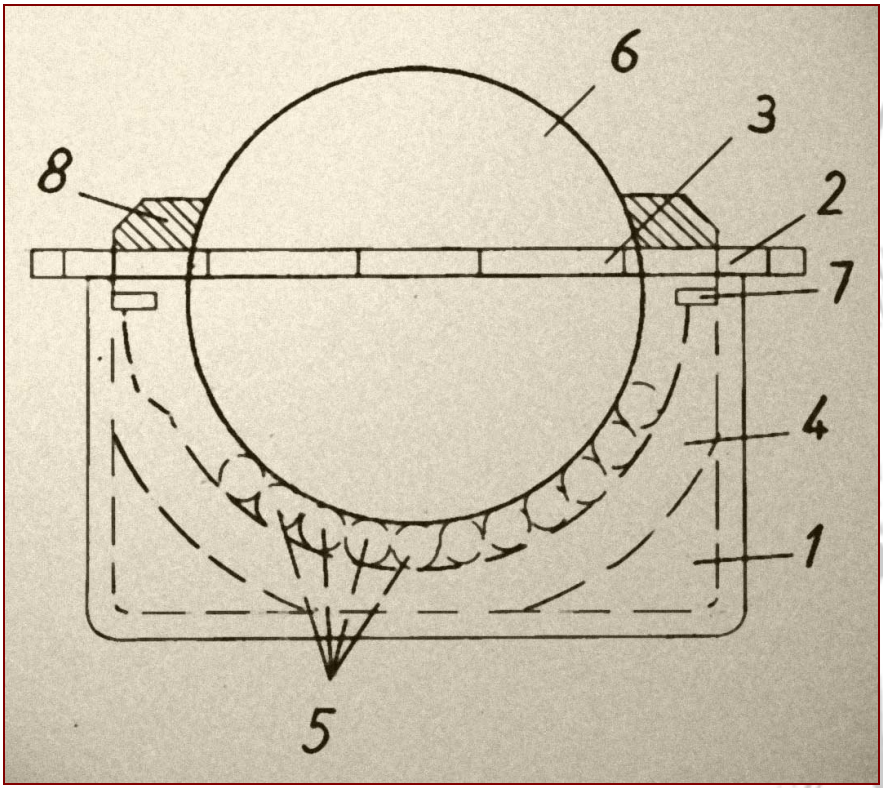


107. *Roulement à rouleaux, Sté Aciers de Haine Ste Reine (1930).*

Le roulement du brevet *(fig 108)* est dit " rouleau à billes ".

Il possède lui aussi des éléments tournants mais ne guide rien en rotation, il permet la rotation d'une grosse bille.

Multipliés, ils sont employés aujourd'hui pour les guidages en translations de grosses charges (types palettes, ...).

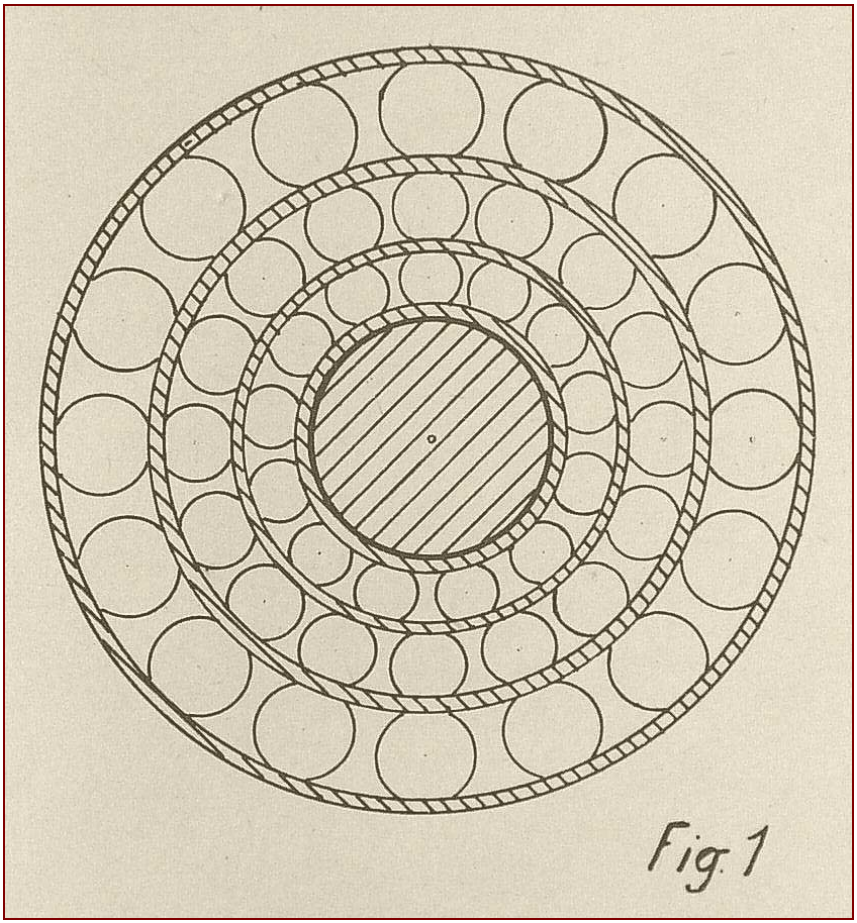


108. *Rouleau à billes, Sté Deutsche Star K. (1960).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Enfin, le roulement du brevet *(fig 109)* est l'un des roulement les plus particuliers qu'il m'aura été donné de voir dans ce travail de " défrichage historique ".

Similaire à des poupées russes (...), c'est un emboîtement de roulements et d'éléments tournants, la multiplicité des billes permettant la diminution du frottement.



109. *Roulement à billes et à galets, Trajan (1960).*

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

La fin de XXème siècle et ses innovations

" Les roulements seront éternels… "

(L. F-X..- Les roulements seront éternels.- Industries et techniques.- octobre 1999, n°808 : Les roulements seront éternels, p. 82-86.)

Aujourd'hui, les innovations les plus importantes dans le domaine des roulements se situent au niveau des états de surface *(fig 110)* et des intégrations d'autres technologies (capteurs, mesures,…) (fig 111, fig 112). Les surfaces des roulements doivent s'adapter à des milieux spécifiques ; sable, températures extrêmes… Des vitesses de l'ordre de 2,2 millions de N x dm rendent nécessaires de telles innovations.

Le facteur N x dm caractérise les roulements tournant à de très grandes vitesses : nombre de tours/min multiplié par le diamètre moyen en mm. Par exemple les roulements dits " classiques " atteignent 1,5 million de N x dm quant aux roulements destinés aux applications de pointe : 2 à 2,5 millions de N x dm.

110. *Roulement en céramique (1980).*

Du point de vue des états de surface, les grands groupes axent leurs recherche sur la tribologie (la science des surfaces visant à réduire frottement et usure) et augmentent la longévité de leurs roulements en utilisant des aciers spéciaux, plus performants. Ainsi, du côté français et avec l'aide d'un aciériste, le fabricant S.N.R. a mis au point une qualité d'acier qui multiplie pratiquement par deux la durée de vie des roulements. L'entreprise allemande F.A.G. s'est aussi beaucoup intéressée à la durée de vie des roulements en fonction de la propreté, ses derniers aciers Cronidur 30 permettent d'augmenter vitesse et résistance à la fatigue. Enfin, fruit de la recherche & du développement, l'entreprise I.S.O. a fait réaliser des roulements tout céramique *(fig 110)*, capables de tenir à 1100 °C.

111. *Capteur mécatronique S.N.R. (1989).*

112. *Vue éclaté d'un capteur incrémental de position intégré au roulement S.N.R. (1999).*

Parmi les toutes dernières innovations, on peut souligner l'important programme E.L.A.D.O.M.M. (Endurance Limit of Actual Bearings Depending on Opérations conditions, Materials and Manufactuhng) qui a mobilisé l'I.N.S.A. de Lyon, l'Université de Porto, B.M.W.-R.R., Renault, les grands des turbines, ainsi que F.A.G. et S.N.R. pendant cinq ans pour réaliser des modèles prédictifs et des codes de calcul, l'objectif étant la durée de vie " infinie " des roulements.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

conclusion

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulent les mécaniques

" Et pourtant elle tourne … "

(Galileo GALILEI, 1564-1542)

On aurait bien tort de penser, en conclusion de ce dossier, que tout ce qui était humainement possible de faire concernant les roulements à déjà été fait… on n'aurait en réalité rien compris aux innovations du siècle précédent qui, en réalité, n'on fait que défricher un domaine encore vaste.

Les innovations que l'on est en mesure d'attendre pour le siècle prochain concernent essentiellement les états de surface et les intégrations à d'autres technologies (microprocesseurs peut-être).

Cependant le roulement qu'il soit à billes, à rouleaux ou à aiguilles se caractérise par un contact mécanique au niveau des élément roulants, ce qui engendre forcément du frottement à l'intérieur du roulement. Dès lors, le grand avenir du roulement réside dans la suppression de tout contact de quelque nature qu'il soit. Un telle innovation existe déjà à l'état embryonnaire: les paliers hydrodynamiques (remplis d'une pellicule d'huile) permettent pour de grandes vitesses de rotation de l'arbre de s'affranchir de tout contact solide (subsiste tout de même un contact fluide).

En fait, cette technologie peut être considérée comme précurseur, en attendant les paliers électromagnétiques et autres technologies encore inconnues, qui marqueraient le grand retour (juste retour par ailleurs…) des paliers, relégués à l'heure actuelle aux faibles vitesses de rotation.

David Perrin
(david.perrin@utbm.fr)
1ère année Génie Mécanique et Conception, UTBM.
(Dossier terminé en décembre 2000)

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

annexes

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Extraits traduits de la revue américaine *" The Pratical Engineer "*, article paru sous la signature de C.J. Benjamin en décembre 1898.

- " L'usage de billes en acier pour réduire le frottement des roulements est en train de prendre une rapide extension et de nouvelles applications en sont faites chaque jour. Le fait qu'une seule compagnie a une production mensuelle de 15 à 20 millions de billes, variant en dimension de 1/16 de pouce à 4 pouces est un indice suffisant de l'importance de cette branche mécanique relativement récente. "

- " En marge du développement de cette technique un fait apparaît en évidence : c'est l'absence presque complète de connaissances précises sur la résistance et la durée des billes en acier, et les résultats qu'on devrait en moyenne obtenir pour ces grandeurs pour des conditions de pression et de vitesse données "

- " En 1895, des séries extrêmement nombreuses d'essais sur la résistance à la rupture de billes en acier fut faite au laboratoire du *Sibley-College* pour le compte de la *Cleveland Machine Screw Company*. On trouvera un résumé des résultats obtenus dans le *Digest of Physical Tests* de janvier 1896. Les tables donnent les valeurs maximum de la résistance à la rupture et des profondeurs d'empreintes dans un plat d'acier dur pour des billes de 1/4 à 2 pouces… "

- " En gros, et en l'absence d'autres données, on utilise en général pour le calcul des roulements un facteur de sécurité de l'ordre de 5, en partant des valeurs moyennes de résistances données par ces tables. Cette règle n'est d'ailleurs que très approximative, car les billes en acier utilisées dans les roulements ne périssent pas par écrasement. "

- " Le roulement continu des billes sous pression étire progressivement les couches extérieures, qui sont dilatées alors que le cœur ne l'est pas, et ceci finit par séparer les couches extérieures du noyau en provoquant la mise hors-service de la bille. La vie de la bille dans ces conditions est à la fois fonction de la vitesse et de la pression. Si l'un ou l'autre de ces facteurs est excessif, la vie du roulement est courte. "

- " Le remède à ceci est d'augmenter le nombre de billes et diviser ainsi les charges spécifiques, et de rouler à une vitesse moindre. Les roulements à billes ont donné plus de satisfaction à des vitesses relativement modérées " · " Un roulement d'une précision spéciale a été mis en oeuvre à 50.000 tours/minute, sans vibrations excessives, mais la pression était dans ce cas presque nulle… "

- " En général, pour un diamètre extérieur donné du roulement, une augmentation des diamètres des billes avec une diminution corrélative de leur nombre donnera un roulement plus solide et plus durable. Sans doute il y a pratiquement une limite à ceci mais il est difficile de dire où peut être cette limite. "

- " La résistance à la rupture est approximativement proportionnelle à la projection de la surface des billes, et probablement il en est de même de la durée… "

- " Pour assurer un parfait contact de roulement, les éléments de roulement doivent être conçus de manière qu'il n'y ait glissement en aucun point, et les billes doivent être exactement de même diamètre. Les aciers utilisés pour les chemins de roulements et pour les billes doivent être durcis par traitement, de préférence rectifiés après traitement pour obtenir une exactitude parfaite. "

- L'utilisation de cages pour maintenir en place les billes n'est pas en général nécessaire, et introduit un élément supplémentaire de frottement. Dans le cas, néanmoins, où il est nécessaire de démonter fréquemment le roulement, un tel moyen évite d'éparpiller et de perdre les billes… "

- " Pour permettre une bonne utilisation et une longue durée de roulement, il est absolument nécessaire de le maintenir propre et à l'abri des poussières. On peut ou non le huiler, les praticiens ne sont pas d'accord sur ce point, mais la propreté est indispensable. Il est probable qu'un léger graissage des billes avec de la vaseline au moment de la mise en route évite la nécessité d'une lubrification avec de l'huile. "

- " La meilleure pratique consiste à réduire les points de roulements à 2 sur chaque bille, à l'extrémité d'un même diamètre et de donner aux chemins de roulement une courbure légèrement moindre qu'aux billes. La bille est ainsi maintenue dans une position assise, elle a un axe fixe et tourne sans glisser. "

- " S'il y a 3 points de contact, il y a obligatoirement un peu de glissement, et le roulement sera irrégulier… "

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

- " Pour terminer il peut être intéressant de résumer les quelques maigres Informations utilisées comme principes directeurs de la conception et de la fabrication de ces genres de roulements. "

  1. " la bille doit être capable de tourner indéfiniment sans se rompre : en quelque sorte la chaîne constituée par les billes doit être sans fin. "

  2. " les billes doivent rouler dans un chemin bien défini et autour d'un axe bien défini et ne doivent glisser en aucun des points de contact. "

  3. " les billes doivent être sphériques et exactement de même diamètre. Si l'une des billes du roulement ne remplit pas ces conditions, le mouvement de toutes les autres en est affecté. "

  4. " Il faut être prudent dans l'utilisation du roulement à grande vitesse" et il y a pour ceci une limite à ne pas dépasser. Ceci indique qu'il y a plus d'intérêt à utiliser ces roulements dans le cas de faible vitesse. "

  5. " Il y a lieu de choisir judicieusement le nombre et le diamètre des billes dans les conditions déterminées, Aucune règle rigide ne peut être donnée. "

  6. " Il ne faut pas essayer d'utiliser des roulements à billes dans tous les cas, ce n'est pas une panacée universelle. "

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Les quadricycles Peugeot, courrier d'un lecteur (horloger) dans le journal *" le cycliste "* paru en juillet 1890.

" Montbéliard, le 2 juillet 1890. Un horloger.

En lisant les correspondances aux nouvelles publiées par *" le Cycliste "*, de temps à autre on y trouve quelques articles traitant: de la vélocipédie soit à vapeur, soit à électricité. Il y a quelque temps, vous avez reproduit dans votre journal un article d'un journal de Mulhouse ayant trait à ce genre de locomotion, mais la plupart de vos lecteurs ignorent sans doute que le vélocipède à pétrole existe réellement. La plus importante manufacture française de vélocipèdes, la maison " Les Fils de Peugeot frères "; s'occupe de ce genre de vélocipèdes, mais il parait que la construction de ce véhicule est passablement difficile.

De cette maison sortaient déjà les vélocipèdes Serpolet, qu'on a pu voir à l'Exposition universelle, mais les résultats obtenus avec ce système de moteur ont pour ainsi dire été nuls. Le vélocipède à pétrole vaut mieux, mais il laisse encore beaucoup à désirer sous le rapport de la pratique et de la simplicité. Le moteur employé est le Système Demler et sort des ateliers Ponhard et Levassor ; il a la force d'un cheval et pèse environ 60 kilos. Il est composé de pistons actionnant la même manivelle avec une vitesse de 600 tours par minute; tous les mouvements de la machine se font comme dans une machine à gaz ordinaire ; l'allumage intérieur se fait au moyen de 2 tubes en platiné chauffés au rouge par 2 becs Bunsen, alimentés aussi par le pétrole.

Le mouvement de la machine est transmis à l'essieu par des engrenages de diverses grandeurs et qui peuvent donner au vélocipède des vitesses différentes, selon le plus ou moins de pente de la route. La forme du vélocipède est assez disgracieuse ; il est à 4 roues et pèse environ 250 kilos (le vélocipède Serpolet en pesait 500). La marche est régulière et a bon marché, car la consommation est à peine d'un litre d'essence de pétrole par heure ; sa vitesse maximum, en plaine est de 20 kilomètres à l'heure ; il gravit des pentes de 10 %, mais alors sa vitesse n'est que de 5 kilomètres.

Les complications et les soins apportés a la construction de ce quadricycle justifient son prix exorbitant, qui est de 3 à 4.000 francs. Comme légèreté et commodité, le pétrole vaut mieux que la vapeur, car une fois en marche on n'a absolument à s'occuper que de la direction, la machine fonctionnant jusqu'à complet épuisement du pétrole, mais le prix et la complication gâtent encore une fois les avantages apportés par la légèreté de la machine. L'un de vos abonnés demandait un jour quel était le meilleur vélocipède automobile ; je lui répondrai qu'ayant étudié la question simplement comme amateur, je choisirais encore le vélocipède Trepardoux, car, malgré ses inconvénients, ce système a donné ses preuves de bon fonctionnement et de durée... "

Extrait de l' article *" jeu de billes "* relatif à la fabrication des roulements, écrit par Max de Nansouty et paru dans la revue *" actualités scientifique "* en 1901.

" C'est une chose instructive que de constater ceci. Au début de toute grande invention utilitaire, de celles qui ont été précieuses à l'humanité en facilitant le travail, en le rendant meilleur et plus économique, il y a tout simplement une observation bien faite ; Archimède, Papin, Stephenson, Giffard, Nobel, et bien d'autres, et tous les autres grands inventeurs, - dont quelques-uns seulement ne sont pas morts dans la misère - nous apportent des preuves du petit principe que nous venons d'énoncer et qu'il est toujours bon de rappeler; car il en découle une méthode, la " méthode pour inventer ". Cette méthode, c'est " l'observation ", l'observation bien faite, puis tout aussitôt raisonnée et contrôlée. On peut inventer toutes sortes de bonnes choses, importantes, moyennes ou minimes, de cette façon-là. Le " roulement à billes ", qui de la bicyclette est passé à l'automobile, nous en offre un nouvel exemple.

Rappelons tout d'abord, à ceux de nos lecteurs qui ne sont ni bicyclistes ni chauffeurs, que l'invention du roulement à billes consiste à remplacer la graisse ou l'huile dans lesquelles on fait tourner les essieux ou les extrémités des arbres de transmission de mouvement par un collier de billes très dures. L'essieu ou l'arbre tourne au milieu de ce collier, les billes se dérobent à tout instant sous la rotation, fuient l'arbre, au lieu de le ronger; finalement on a un roulement tout aussi doux, plus doux, et surtout plus propre que celui qui se produit au sein de la graisse, ou en huilant les surfaces en contact avec prodigalité.

Or donc, comment a-t-on pensé a cette heureuse combinaison ?

Ce fut bien simple. Un ingénieur se promenait souvent au bord de la mer dans une station balnéaire peu fréquentée. Il marchait sur un chemin que l'on avait sablé - si l'on peut s'exprimer ainsi - avec des galets roulés par la mer, et dont la plupart étaient devenus ronds comme de véritables billes. A chaque instant il glissait sur cet instable terrain; un beau jour, il s'y donna une très belle entorse qui le retint au lit pendant plusieurs jours.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Que faire au lit, pour un ingénieur, sinon de réfléchir ? Le notre analysa les causes de son accident, se remémora tout ce qu'il savait sur le frottement de glissement et le frottement de roulement, et conclut que rien n'était meilleur qu'un jeu de billes étendu par terre pour attraper des entorses. Si bien qu'aussitôt guéri et rentré dans son usine, il remplaça un des paliers graisseurs à huile de sa transmission de mouvement par un collier de billes en marbre placées dans une rainure.

Le principe était trouvé. A la vérité, les billes en marbre étaient défectueuses; elles s'usaient vite en frottant les unes sur les autres et leur poussière rongeait l'arbre en rotation. On leur substitua donc toutes sortes d'autres billes, en métal dur ou en métal trempé. C'est à cette formule que l'on doit, à l'heure actuelle, les excellentes petites billes des roulements de bicyclettes et d'automobiles.

Elles font du " graissage mécanique " sans graisse : leurs défauts sont de devenir ovales, de " s'ovaliser ", au bout d'un certain temps, quelque dure que soit leur matière, et surtout de se rompre parfois, très rarement il est vrai. Mais quel est le système qui n'a pas ses défauts à côté de ses qualités ?

La fabrication de ces billes en métal dur est une des curiosités industrielles actuelles. Au début, on tournait les billes, puis on les chargeait de s'arrondir les unes les autres en les agitant, pendant des jours et des jours, dans des cylindres tournants analogues à ceux dans lesquels on brûle le café. On n'en finissait pas de tourner de cette façon, l'exactitude des billes était insuffisante, et elles coûtaient trop cher. Maintenant, on a combiné tout un outillage de fabrication, perfectionné et rapide, qui repose sur l'emploi des meules.

On prend des barres d'acier dans lesquelles une machine nommée découpeuse coupe des flans qui deviendront des billes. Cette machine, sorte de cisaille rotative, découpe aisément soixante-dix mille flans à l'heure. Les flans, qui ressemblent à une petite boîte d'allumettes comme forme, passent dans un four qui les réchauffe, puis de là dans une machine à forger à cylindres cannelés. Pris dans les cannelures, tournés, retournés, " mâchés " en quelque sorte, ils perdent leurs angles et leurs arêtes, et deviennent vaguement ronds.

Alors, les voila prêts à passer à la meule, *damntus ad molam* comme disait la bonne grammaire de Lhomond. Des meules dégrossissantes continuent la besogne commencée : des meules finisseuses la terminent. Les billes engagées dans les rainures d'un plateau tournant, rainures enroulées en spirales, en boucles, en labyrinthe, sont emportées dans un furieux mouvement de tournoiement autour de leur axe, en même temps qu'elles font des kilomètres de promenade dans les rainures du plateau. Et toujours, devant ce plateau, tourne, tourne la meule d'émeri à la surface mordante qui ne rencontre pas une des malheureuses billes sans mordre, comme le ferait une lime, tout ce qui dépasse l'alignement sphéroïdal... On arrive ainsi à faire des billes de trois millimètres de diamètre irréprochables, dont l'exactitude est garantie à " un quatre centième de millimètre " près.

Voilà les billes fabriquées : elles sont alors lavées et polies avec une matière polissante très douce. On leur fait subir une dernière opération de réception ayant pour but de refuser, de " rebuter " celles qui ne seraient pas exactement sphériques, ou qui auraient une paille intérieure risquant de les faire se briser, ou bien quelque défaut imperceptible.

On s'imaginerait volontiers que cette opération de vérification finale doit s'effectuer avec des appareils micrométriques d'une délicatesse parfaite. Erreur complète ! On ne parviendrait pas à contrôler ainsi des centaines de milliers de billes. L'organe de vérification le plus simple, le plus économique, et le plus rapide que l'on ait pu mettre en œuvre, ce sont l'œil et la main d'ouvriers, et surtout d'ouvrières spécialistes. Avec une étonnante dextérité, ils prennent, soupèsent, lorgnent, et retournent les billes déposées devant eux, en tas, dans des corbeilles. Ils en mettent quelques-unes de côté comme insuffisantes ou inexactes, et les autres, la plus grande partie, dans la corbeille qui porte la mention " Reçues ". Ensuite, on peut passer au micromètre et au calibreur une des billes refusées, la casser, l'examiner au microscope : on peut être certain qu'elle était impropre au service. Prend-on une des billes reçues ? Le contrôle expérimental confirmera le diagnostic des essayeurs : on voit qu'il ne fait pas bon de " jouer aux billes " avec ces gaillards-là, on serait certain de perdre la partie. "

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Roulement

[Rulmâ] n. m. - *de rouler* (1903) le Roulement à billes est un mécanisme destiné à diminuer les frottements entre des pièces roulant l'une sur l'autre, formé de billes d'acier insérées entre les organes flottants ; *roulement à aiguilles, à rouleaux cylindriques, coniques*.

- Citons au propos de cette définition un extraits traduit du français contemporain de " L'encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences et des arts ", Diderot et d'Alembert :

  " […] , f. m. en terme de Mécanique, signifie une force de mouvement circulaire, par lequel un mobile tourne autour de son propre axe ou centre, et en même temps applique continuellement de nouvelles parties de la surface au corps sur lequel il se meut (…)

  On trouve par l'expérience , que le frottement qu'un corps éprouve en roulant, c'est-à-dire, la résistance qui vient des inégalités du plan sur lequel il roule, est moindre que le frottement que le même corps éprouverait en glissant. La raison en est assez à apercevoir après ce que nous venons de dire sur le roulement des corps ronds. Car il est visible que ce roulement aidant à désengrener les parties, diminue beaucoup le frottement ... C'est pour cela que les roues sont si sort en usage dans les machines, et qu'on les charge de la plus grande partie qu'il est possible de l'action , afin de rendre la résistance moindre. "

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Palier

[palje] n. m. - *de paelier* (1287) de l'ancien français *paele* " poêle ". En mécanique, il s'agit d'une pièce fixe supportant l'arbre de transmission d'une machine. *Paliers d'un moteur d'auto. Palier de butée*, qui empêche le glissement longitudinal de l'arbre.

- ***Selon la norme ISO 4378/1 (NF E 22-500), les paliers sont définit comme suit :***

  Le palier est un support ou guide qui détermine la position d'une pièce mobile par rapport aux autres pièces d'un mécanisme. Le palier lisse est un palier dans lequel intervient uniquement le frottement dû au glissement. Le palier autolubrifiant est un type de palier lisse dont la lubrification est assurée par le matériau du palier, par ses éléments ou par un film de lubrifiant solide.

Coussinet

[kusine] n. m. - *de coussin* (1863). En mécanique, le coussinet est une pièce cylindrique creuse placée dans un support (palier) et qui soutient une extrémité du tourillon de l'arbre. *Coussinet en bronze, en alliage antifriction. Coussinet de tête de bielle. - Coussinet (de rail)* : pièce sur laquelle repose le rail.

- ***Selon la norme ISO 4378/1 (NF E 22-500), le coussinet est définit comme suit :***

  Le coussinet est un élément amovible d'un palier lisse dont la surface intérieure constitue une surface de glissement.

sources

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Ouvrages

- Diderot et d'Alembert.- *Encyclopédie raisonnée des sciences et des arts*.
- Ecole Polytechnique.- *Paliers graisseurs et boites à huile, portefeuille des élèves*.- Paris : Ecole Polytechnique. 1880.
- Ets Peugeot.- *Vélocipèdes Peugeot*.- Paris : Imprimerie du Griffon. 1899.
- De Nansouty Max.- *Actualités scientifiques*.- Félix Juven. 1901.
- Champly René.- *Le moteur d'automobiles à la portée de tous*.- Paris : Librairie générale scientifique et industrielle H. Desforges. 1909.
- Descarces Henri.- *Nouvelle encyclopédie pratique de mécanique et d'électricité, tome 1*.- Librairie Aristide Quillet. 1924.
- Encyclopédie des sciences industrielles Quillet.- *Mécanique généralités et applications*. 1930.
- Dommain J.G..- *Roulements à billes et à rouleaux, première partie, étude physique des roulements, Institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique*.- La Revue d'Optique. 1951.
- Leloup Lucien.- *Etude de la lubrification et calcul des paliers, lois théoriques et expérimentales*.- Paris : Dunod. 1962.
- Bourzès M..- *Quelques idées sur les roulements*.- La métallurgie et la construction mécanique. 1966.
- Palmgren Arvid.- *Les roulements, description, théorie, applications*.- S.K.F.. 1967.
- FAG Kugelfischer Georg Schäfer & Co. Schweinfurt.- *Paliers et roulements FAG pour les antennes paraboliques*.- Germany. 1971.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

- Gillmann Jean.- *Les engins de levage, tome 1*.- Paris : Dunod. 1972.
- Sté Française des Pétroles BP.- *La théorie de la lubrification et ses applications*.- Paris : Pyc édition. 1974.
- Sharp Archibald.- *Bicycles & Tricycles, an elementary treatise on their design and construction*.- The M.I.T. Press. 1979.
- Charles Coulston Gillispie.- *Dictionary of scientific biography, tome 9*.- New york : Charles Scribner's Sons. 1981.
- *Les roulements, tome 1, technologie simplifiée*.- (Publication réalisée par un groupe de professeurs de l'enseignement technique et d'ingénieurs spécialisés)
- Claude Jacques et Davanture Claire.- *S.N.R..- Les roulements*.- Paris : S.N.R. Roulements et Nathan Communications. 1988.
- Oppizzi Claude-Stéphane.- *Rapport : Peugeot quadricycle type A*.- C.2.E.. 1990.
- Costantino Maria et Reid Aileen.- *Léonard De Vinci*.- Hong Kong : P.M.L. éditions. 1992.
- *Inventeurs et scientifiques, dictionnaires de biographies*.- Paris : Larousse. 1994.
- De Galiana Thomas et Rival Michel.- *Dictionnaires des inventeurs et inventions*.- Paris : Larousse. 1996.
- S.N.R..- *S.N.R., les techniques et applications du roulement*.- S.N.R.. 1996.
- Quatremer R. et Trotignon J.-P. et al.- *Construction mécanique, tome 1 : projets-calculs, composant et normalisation*.- Paris : Nathan. 1996.
- Alain Rey.- *Le petit Robert des noms propres, grand format*.- Paris : dictionnaires Le Robert. 1997.
- Dejabs M. et Lehu M. et al.- *Construction mécanique, tome 3 : projets-calculs, dimensionnement, normalisation*.- Paris : Nathan. 1997.
- S.N.R..- *Technologie du roulement*.- S.N.R. Group. 2000.

- Hermann Geneviève.- Vitesses plus élevées avec les céramiques.- *Industries et techniques*.- octobre 1988, n°676, p. 81.

- Bonnier Pierre.- Un composant de haute technologie.- *Maintenance entreprise*.- mars 1998, n°508, p. 37-42.

- Roulements de broches.- *Entraînements & systèmes*.- mai / juin 1998, n°4, p. 10-15.

- L. F-X..- Les roulements seront éternels.- *Industries et techniques*.- octobre 1999, n°808 : Les roulements seront éternels, p. 82-86.

- Les roulements rêvent de la vie éternelle.- *Entraînements & systèmes*.- 1999, n° annuel, p. 26-28.

- Durbourg Jean.- La mécanique américaine imposera-t-elle les roulements à rouleaux ?.- *La science et la vie*.- n° 32, p. 489-497.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Brevets d'inventions. Institut national de la propriété industrielle (INPI), Archives départementales de Belfort, extraits de 1902 à 1970.

1902

1902 / 317 742	Palier anti-friction à rouleaux	Sté Moffett Bearing Company
1902 / 317 949	Système de roulement à billes	M. Davies
1902 / 320 914	Perfectionnement aux coussinets à rouleaux	M. Léon Le Brun
1902 / 322 287	Perfectionnements au graissage des paliers	M. William-Arthur Young
1902 / 323 164	Palier à billes	M. Heinrich Brinkmann
1902 / 323 245	Coussinet d'appui pour axe de centrifuges	M. Olof Ohlsson
1902 / 324 926	Coussinet anti-friction	M. Chester A. Latham
1902 / 326 301	Dispositif de roulement pour rotations rapides	M. Olof Ohlsson
1902 / 326 729	Coussinet à rouleaux	M. Amos Clinton Stilson
1902 / 326 944	Perfectionnement aux paliers en bois	M. Alexandre Giron
1902 / 327 273	Coussinet à billes	M. Albert Ennis Henderson

1903

1903 / 328 288	Coussinet à billes	M. Milo Harris
1903 / 329 836	Coussinets à rouleaux	M. Albert Ennis Henderson
1903 / 331 948	Coussinet à billes	M. Marcellus Reid
1903 / 332 292	Couronne de roulement pour coussinet à rouleaux	M. J. Schmid-Roost
1903 / 332 444	Perfectionnement aux coussinets à rouleaux	M. William Houldsworth
1903 / 334 329	Perfectionnement aux coussinets à billes	M. Robert Conrad
1903 / 335 070	Coussinets à billes et à rouleaux	M. Headly V. Hillcoat
1903 / 338 027	Coussinets à rouleaux	M. John Kincaid
1903 / 338 290	Perfectionnement roulements et coussinets	M. Robert Conrad
1903 / 338 363	Perfectionnement roulements et coussinets	M. Robert Conrad
1903 / 338 666	Perfectionnement roulements et coussinets	M. Robert Conrad

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

1904

1904 / 340 215	Dispositif de roulements à billes	Sté Erste Automatische G.
1904 / 340 228	Roulement à billes sphéro-annulaire	Sté Malicet et Blin
1904 / 340 433	Perfectionnement aux roulements à billes	M. Ernest Gustav Hoffmann
1904 / 342 452	Roulement à billes s'adaptant aux paliers d'arbres	M. Georges Gabriel Fichet
1904 / 343 301	Système de roulement à billes	M. Edmond Alfred Burnouf
1904 / 344 546	Perfectionnements aux roulements à billes	M. Auguste Georges Latil
1904 / 345 240	Coussinet à billes	M. Wilhelm Höpflinger
1904 / 345 447	Roulements à billes	Sté J. Sapène
1904 / 346 036	Système par roulement à billes	M. Auguste-Marie Michel
1904 / 346 130	Roulements à billes	M. Frantz Paquin
1904 / 346 274	Perfectionnement aux roulements à billes	Sté Française de Roulements
1904 / 348 175	Coussinet à billes	Sté Deutsche Waffen und M.
1904 / 348 714	Roulements à billes applicables aux roues	M. Camille Hautier
1904 / 348 818	Roulements à billes	M. Auguste Cambon fils

1910

1910 / 407 489	Coussinet à billes excentré	Cie Française D.W.F.
1910 / 411 465	Dispositif de roulement à billes	M. Laussedat
1910 / 415 765	Roulement à rouleaux	Sté les fils de A. Derome

1920

1920 / 501 801	Roulement à billes globique	M. Rosengart
1920 / 504 395	Roulement à billes	M. Beduneau

1930

1930 / 688 552	Roulement à billes universel	M. Limon
1930 / 693 801	Roulement à rouleaux	Sté Aciers de Haine Ste Reine
1930 / 687 736	Palier à rouleaux	Sté Killian Bearing Company

1940

1940 / 858 186	Roulement pour vitesses de rotation élevées	Sté Junkers F.M.A.
1940 / 862 103	Roulement à rouleaux	M. A. E. Bratt
1940 / 862 154	Roulement à rotule à 2 rangs de billes sans cage	M. Beduneau

1950

1950 / 964 255	Perfectionnement relatif à des roulements doubles	Sté Timken
1950 / 968 267	Roulement à billes nouveau et protection	M. Frenkel
1950 / 971 246	Roulement à éléments cylindriques de roulements	Sté des Roulement à Aiguilles

1960

1960 / 1 220 891	Roulement sans friction	Sté Chaning Corporation
1960 / 1 233 571	Roulement à billes et à galets	M. Trajan
1960 / 1 235 238	Rouleau à billes	Sté Deutsche Star K.

1970

1970 / 1 589 491	Nouveau roulement double à cuvettes embouties	Sté S.K.F.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Crédit photographique

Tous les ayant-droits n'ayant pu être identifiés, leurs droits sont réservés.

S.N.R.: 6, 8, 10, 12, 14, 14a, 16, 16a, 18, 20, 22, 22a, 24, 26, 110, 111, 112.

Groupe PSA: 53, 54, 55, 57.

B.P.: 31.

David Perrin: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 56, 58.

"roulent les mécaniques", 2001. **ISBN:** 2-914279-01 -9

Retrouvez tout l'intérêt de la version mise en ligne de *« roulent les mécaniques »* sur Internet :

http://www.utbm.fr, rubrique publications.

Ce document est à libre disposition de tout lecteur. Les enseignants qui souhaitent l'utiliser avec leurs classes, peuvent le faire.
En revanche, toute exploitation commerciale est interdite, sauf autorisation expresse de l'UTBM auprès du Service éditorial.
nb: l'original de cette publication a fait l'objet d'une protection auprès des services de la Société des gens de Lettres (SGDL).
Centre d'innovation pédagogique et pôle éditorial, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard / yves.lequin@utbm.fr
ISBN: 2-914279-01-9 / **maj:** 24/04/2001